

بررسی نقش شورابه‌های حوضه‌ای و تبادلات سیال-سنگ در رخداد کانسار مرتبط با ناپیوستگی فلونوریت-باریت±سولفید آتش کوه، جنوب دلیجان

ابراهیم طالع فاضل؛

دانشگاه بوعلی سینا همدان، گروه زمین‌شناسی

پذیرش ۹۴/۱۲/۱۵

دریافت ۹۳/۷/۱۴

چکیده

شورابه‌های حوضه‌ای غنی از فلز به‌عنوان عامل کلیدی در شکل‌گیری ذخایر فلونوریت-باریت (سرب و روی) مرتبط با ساختار هستند که در اغلب موارد منشأ فلز و مواد معدنی از سنگ بستر زیرین تأمین می‌شود. کانسار رگه‌ای فلونوریت-باریت±سولفید آتش کوه در جنوب‌شرق استان مرکزی، نمونه‌ای از این ذخایر است که کانی‌سازی در آن با ماهیت اپی‌ژنتیک و ساخت و بافت‌های پرکننده فضای خالی، برشی و حفره‌ای در سنگ میزبان کربناته-شیلی با گستره زمانی ژوراسیک پیشین تا میانی شکل گرفته است. کانی‌سازی رگه‌ای در ارتباط با شکستگی‌های محلی با راستای ESE-WNW و NNE-SSW تشکیل شده، که همراه آن دگرسانی‌های دولومیتی، سیلیسی و آرژیلیک قابل مشاهده است. علاوه بر این، مقادیر ناچیزی از کانی‌های سولفیدی گالن، پیریت و کالکوپیریت نیز به‌صورت پراکنده در رگه‌ها مشاهده شد. طبق شواهد، کانی‌سازی فلونوریت و کانی‌های همراه، طی سه مرحله در منطقه شکل گرفته است که در آن سه تیپ میانبار به‌ترتیب فراوانی شامل: (۱) میانبارهای آبگین غنی از مایع (L+V)، (۲) حاوی فاز جامد (L+V+S)، (۳) دارای فاز CO₂ (L₁+L₂+V)، در کانی‌های فلونوریت، باریت و کوارتز تشخیص داده شد. بر مبنای قطع ایزوکوره‌های میانبارهای آبگین و دارای فاز CO₂، کانی‌سازی مرحله نخست در فشار ۱۵۰ Mpa و دمای ۲۵۰°C و کانی‌سازی مرحله پایانی در فشار کم‌تر از ۱۰۰ Mpa و دمای ۲۰۰°C رخ داده است. طبق شواهد ریزدماسنجی میانبارهای سیال، بنظر می‌رسد در منطقه آتش‌کوه شورابه‌های حوضه‌ای غنی از نمک، ضمن انجام تبادلات وسیع سیال-سنگ، دچار تحولات شیمی سیال از طیفی غنی از Na به طیف شورابه‌های غنی از Ca-K-Mg±Na شده است. طی این فرآیند رخداد متاسوماتیزم-Mg و دگرسانی دولومیتی، موجب افزایش نسبت Ca/Na سیال و تشکیل کانی‌سازی فلونوریت شده است. طبق این شواهد، می‌توان گفت رگه‌های فلونوریت-باریت±سولفید کانسار آتش‌کوه احتمالاً در نتیجه اختلاط غیر هم‌دمای اعضای انتهایی یک شورابه Na-K±Ca-Mg اولیه (با منشأ واحدهای تبخیری تریاس-ژوراسیک) و شورابه‌های غنی از کلسیم (ناشی از تبادلات سیال-سنگ)، شکل گرفته‌اند. پس از آن، تزریق آب‌های جوی رقیق‌شده در نتیجه فشارزدایی و جابه‌جایی وسیع آن‌ها در افق‌های زیرین، طی مراحل پایانی کانه‌زایی رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: شورابه‌های حوضه‌ای، تبادلات سیال-سنگ، فلونوریت-باریت، اختلاط، آتش‌کوه

tale.fazel@gmail.com

*نویسنده مسئول

مقدمه

شورابه‌های حوضه‌ای دیرینه با ترکیب Na-Ca-K-Fe-Cl و شوری متوسط تا بالا قادرند ضمن جابه‌جایی و مهاجرت از سنگ بستر و پهنه‌های گسلی، تحت شرایط مناسب ذخایر فلزی و غیرفلزی متعددی نظیر Pb-Zn, Cu, F, Ba و U را تشکیل دهند [۱]، [۲]. بررسی ارتباط میان خصوصیات ژئوشیمیایی یک ذخیره و شورابه‌های حوضه‌ای سازنده، به واسطه وجود ترکیب‌های متنوع و تحولات متعدد رخ داده طی تکامل ذخیره (نظیر تبادلات وسیع سیال-سنگ) همواره پیچیدگی‌هایی دارد [۲]، [۳]. در سال‌های اخیر محققان مختلفی، دست‌یابی به نحوه شکل‌گیری ذخایر Pb-Zn-F-Ba مرتبط با سیالات گرمایی غنی از نمک^۱، را بررسی کرده‌اند که در آن ارتباط، شیمی سیال دیرینه با عواملی نظیر عملکرد دیاژنز، چرخش سیال، رخداد اختلاط و تکوین بستر ژئودینامیکی ذخیره، بررسی شده است [۲]-[۷]. علاوه بر این، دست‌یابی به محتوای فلزی و توان فلزایی عناصر Pb-Zn همراه با ذخایر فلوئوریت با سنگ بستر دگرگونه پالئوزوئیک، در بسیاری از نقاط دنیا گزارش شده که از شاخص‌ترین آن‌ها می‌توان به کمربندهای فلوئوریت-باریت اپی‌ژنتیک غرب و مرکز اروپا، شمال آفریقا و آپالاش اشاره کرد [۸]-[۱۱]. کشور ایران با داشتن ۰/۶ درصد (معادل ۱/۴ میلیون تن) از مجموع ذخایر فلوئوریت دنیا [۱۲]، دارای معادن و رخدادهای معدنی فراوانی است که بخش مهمی از این ذخایر به همراه ذخایر سولفیدی سرب و روی در پهنه دگرگونی-ساختاری سنج-سیرجان واقع شده است. این کانسارها اغلب قابل مقایسه با ذخایر تیپ دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) معرفی شده‌اند [۱۳]، [۱۴] که تاکنون بررسی‌های جامعی بر شیمی سیال فلوئوریت‌ساز و ارتباط آن با پتانسیل کانی‌سازی سولفیدی در آن‌ها انجام نشده است.

کانسارهای فلوئوریت-باریت-کلسیت-سولفید محلات شامل: چهار ذخیره آتش‌کوه، باقرآباد، دره‌بادام و بُزِجان (چکاب) در محدوده‌ای به وسعت ۴۰ کیلومتر مربع، در جنوب‌شرق استان مرکزی و بخش شمالی پهنه سنج-سیرجان قرار گرفته‌اند (شکل ۱). این ذخایر را گروه صنعتی و معدنی پودرسازان از سال ۱۳۸۵ استخراج کرده‌اند که در حال حاضر، کانسار فلوئوریت بُزِجان تنها ذخیره فعال از این مجموعه است. کانسار فلوئوریت-باریت-سولفید آتش‌کوه به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین ذخایر فلوئوریت در ایران، تاکنون از دیدگاه زمین‌شناسی، خصوصیات کانه‌زایی و نحوه شکل‌گیری بررسی نشده است. در این پژوهش خصوصیات کانه‌زایی کانسار آتش‌کوه شامل کانی‌شناسی، بافت و ساخت و ژئومتری رگه‌ها به‌همراه دگرسانی و سنگ‌میزبان کانی‌سازی بررسی شده است. هم‌چنین با استفاده از پژوهش میانبارهای سیال ضمن بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و تخمین فشار-دما سیال، تأثیر تبادلات سیال-سنگ و ترکیب شیمی سیال کانه‌ساز بررسی شده، که با توجه به آن احتمال رخداد ذخایر فلزی در اطراف کانسار آتش‌کوه بررسی شده است.

روش بررسی

به‌منظور بررسی کانی‌سازی در منطقه آتش‌کوه، نمونه‌برداری از تعداد ۴۰ نمونه سنگی از واحدهای سنگی میزبان، رگه‌های فلوئوریت و دگرسانی‌های همراه، انجام شد. براین اساس، پژوهش‌های کانی‌شناسی، بافت و ساخت ذخیره و مراحل تشکیل کانسنگ با استفاده از تعداد ۲۵ مقطع نازک، نازک-صیقلی و صیقلی با میکروسکوپ نوری پلاریزان زایس (مدل Axioplan2) با نور عبوری و بازتابی در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (IMPRC)، انجام شد. علاوه بر این، تعداد ۱۰ نمونه پودری از بخش‌های دگرسان کانسنگ به‌منظور تکمیل پژوهش‌های کانی‌شناسی با دستگاه پراش‌سنجی اشعه ایکس (XRD)، در IMPRC تجزیه شد.

1. Hypersaline

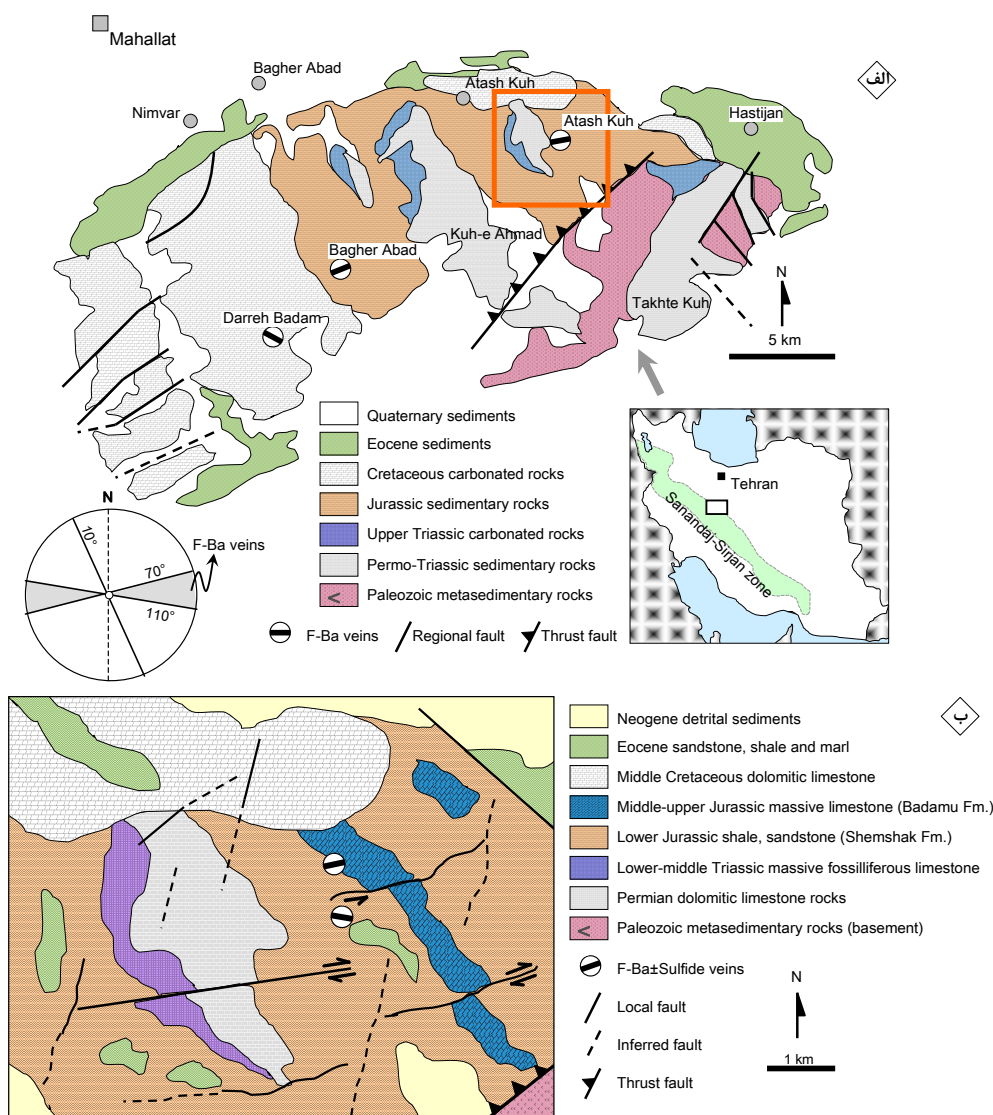
پژوهش‌های سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی میانبارهای سیال پس از انجام بررسی‌های کانی‌شناسی و تعیین موقعیت کانی‌ها در توالی پاراژنتیک کانسار انجام شد. به این منظور، تعداد ۸ مقطع دوبرصیقل با ضخامت متوسط ۲۰۰ میکرون از کانی‌های فلونوریت، کوارتز و باریت در کارگاه مقطع‌گیری دانشگاه خوارزمی تهران تهیه شد. طی این بررسی‌ها، حدود بیش از ۴۰۰ میانبار از نظر ریزدماسنجی آزمایش شد که اندازه‌ی اغلب آن‌ها بین ۱ تا ۵۰ میکرون متغیر بوده است و در این میان، میانبارهای با ابعاد ۵ تا ۲۰ میکرون از لحاظ ریزدماسنجی بررسی شدند. پژوهش‌های میانبارهای سیال با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان زایس مدل Axioplan2 و سیستم سرمایش-گرمایش لینکام مدل THM600 با کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP، در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. گستره تغییرات دمایی در این دستگاه بین ۱۹۰- تا ۶۰۰°C است که ترموکوپل دستگاه با میانبارهای سنتزی در دماهای ۵۶/۶°C- و ۳۷۴/۱°C+ در همان مرکز کالیبره شده است. دقت اندازه‌گیری طی سردکردن در حدود ۱/۱°C± و طی عملیات گرمایش ۲°C± است. میزان عملیات سرمایش و گرمایش به ترتیب ۲ تا ۳°C و ۵ تا ۸°C در دقیقه متغیر بوده است.

موقعیت زمین‌شناسی

پهنه دگرگونه-ساختاری سنندج-سیرجان به‌طور عمده متشکل از واحدهای دگرگونه پالئوزوئیک و واحدهای رسوبی مزوزوئیک است که به‌ویژه طی فاز کوهزایی سیمین و پدیده‌های دیناموترمال مرتبط با آن [۱۵] بارها دچار دگرشکلی شده و موجب رخداد کانی‌سازی‌های فلزی و غیرفلزی متعددی شده است. از جمله این مناطق کانی‌سازی، کانسار فلونوریت آتش‌کوه در فاصله ۱۵ کیلومتری جنوب دلیجان و شمال محدوده کانسار طلای موه را می‌توان نام برد که طبق تقسیمات ساختاری ایران [۱۶]، [۱۷] در بخش شمالی پهنه سنندج-سیرجان قرار گرفته است (شکل ۱). منطقه بررسی شده در برگه ۱:۲۵۰۰۰۰ گلیپگان [۱۸] قرار می‌گیرد، که زمین‌شناسی ناحیه‌ای آن نخستین بار تیله و همکاران [۱۹] و سپس رشیدنژاد عمران [۲۰] بررسی کرده‌اند. هم‌چنین برای پی‌بردن به سن واحدهای سنگی منطقه از پژوهش‌های جدید [۲۱]، [۲۲] نیز استفاده شده است. براین اساس، قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه عمدتاً در جنوب‌شرق روستای آتش‌کوه در منطقه‌ای به نام تخته‌کوه رخنمون دارند که متعلق به واحد دولومیتی سازند سلطانیه (کامبرین-ئوپروتروزوئیک) است. این واحدها شامل: شیل و ماسه‌سنگ‌های سازند لالون-زاگون (کامبرین)، شیل و ماسه‌سنگ‌های کربونیفر و آهک‌های دولومیتی پرمین هستند (شکل ۱). روی این سازندها، آهک‌های ضخیم لایه قهوه‌ای تا زرد رنگ تریاس پایینی تا میانی، قرار گرفته که این واحد سنگی به‌طور ناپیوسته با شیل و ماسه‌سنگ‌های آهکی سازند شمشک (ژوراسیک زیرین) و واحد آهک دولومیتی ضخیم لایه سازند بادامو (ژوراسیک میانی تا بالایی) پوشیده شده است. سازندهای شمشک و بادامو به‌عنوان سنگ میزبان‌های اصلی کانه‌زایی فلونوریت در منطقه آتش‌کوه هستند که با ضخامت تقریبی ۱۵۰۰ متر [۲۳] در برخی مناطق با یک چین‌خوردگی ضعیف تا مرز زیرین رخساره شیست‌سبز دگرگون‌شده و به اسلیت و فیلیت تبدیل شده‌اند. پس از این واحدها، طی کرتاسه واحدهای سنگی آهک و دولومیت ضخیم لایه اوربیتولین‌دار به‌همراه میان لایه‌هایی از شیل و مارن نهشته شده است که این واحدها به‌ویژه در شمال روستای آتش‌کوه رخنمون دارند (شکل ۱).

به عقیده‌ی محجل [۲۴] و قاسمی و تالبوت [۲۵]، رسوبات ضخیم‌لایه مزوزوئیک در بخش شمالی پهنه سنندج-سیرجان که منطقه آتش‌کوه نیز در آن قرار می‌گیرد، مرتبط با رخداد یک ریفت ناقص در این ناحیه است که دارای آثار ناچیزی از سنگ‌های ماگمایی (از قبیل تراکی‌اندزیت و آندزیت‌بازالت) است و رسوب‌گذاری آن تا اواخر کرتاسه ادامه داشته است. در

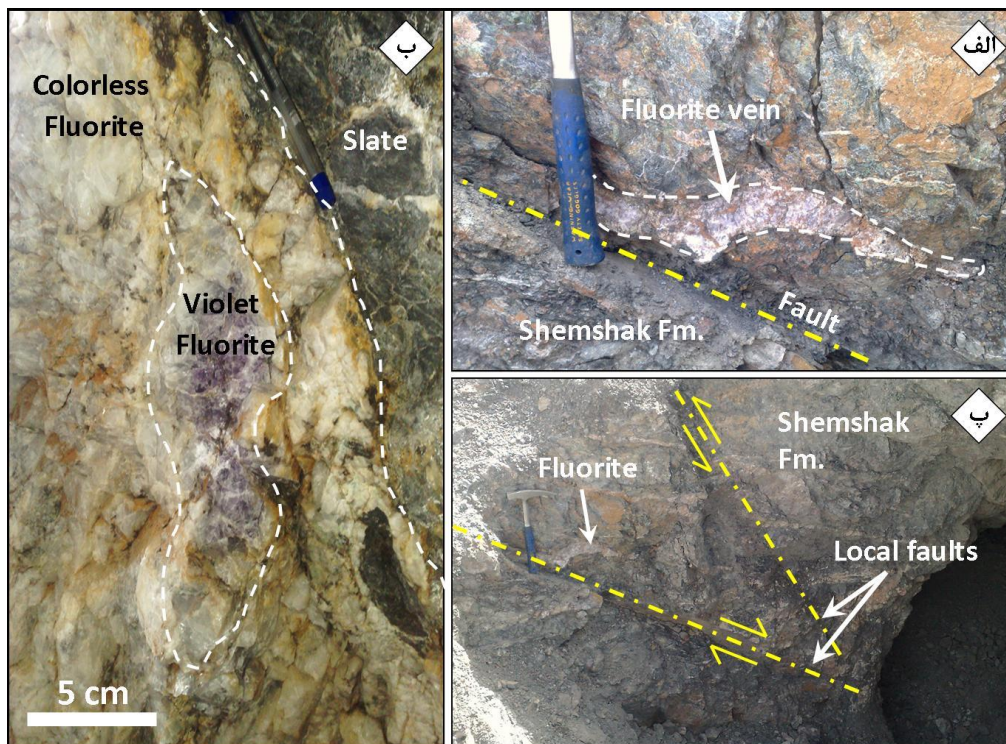
اوایل ترشیری با بسته شدن این ریفت، توده های نفوذی گرانیت، آلکالی سینیت و گابرو به سن میوسن-پلیوسن همراه با واحدهای آتشفشانی-رسوبی با فاصله بیش از ۵۰ کیلومتر در غرب و جنوب غرب آتشفشانی، واقع در شمال خمین، رخ داده اند [۲۳]. از مهم ترین پدیده های ساختاری در منطقه آتشفشانی، می توان به گسل تراستی کوه احمد با راستای NE ۴۰ در فاصله ۲ کیلومتری جنوب کانسار اشاره کرد که از ارتفاعات اصلی منطقه است و موجب رانده شدن واحدهای دگرگونه-رسوبی پالئوزوئیک روی سازندهای ژوراسیک میزبان کانی سازی شده است (شکل ۱). طبق شواهد، این گسل معکوس نقش مهمی در جابه جایی واحدهای سنگی و تحولات ساختاری منطقه داشته که در شکل گیری و ژئومتری رگه های فلوتوریت-باریت-سولفید کانسار آتشفشانی نیز بی تأثیر نبوده است. شکستگی ها در منطقه آتشفشانی، دارای سه راستای اصلی شامل NW-SE، ESE-WNW و NNE-SSW است که دسته اول از شکستگی های ناحیه ای پهنه ساندج-سیرجان پیروی کرده و دو دسته دیگر که میزبان کانی سازی رگه ای نیز هستند اغلب به صورت محلی در منطقه رخنمون دارند (شکل ۱).



شکل ۱. الف) نقشه زمین شناسی منطقه جنوب شرق محلات واقع در بخش شمالی پهنه ساندج-سیرجان و موقعیت کانسارهای فلوتوریت آتشفشانی، دره بادام و باقرآباد در آن (با تغییرات از [۱۸]، ب) نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه آتشفشانی در آن موقعیت و راستای رگه های فلوتوریت-باریت-سولفید نمایش داده شده است

کانی‌سازی و ژئومتری رگه‌ها

ذخیره فلئوریت-باریت-سولفید آتش‌کوه به‌صورت رگه‌ای و ماهیت اپی‌ژنتیک در میزبان سنگ‌های آهکی، آهک دولومیتی، شیل و اسلیت‌های سازند شمشک و بادامو با گستره‌ی زمانی ژوراسیک پیشین تا میانی شکل گرفته است (شکل ۲الف). کانی‌سازی فلئوریت با رنگ‌های بنفش، بی‌رنگ و خاکستری در دو رگه اصلی با فاصله تقریبی ۱ کیلومتر از هم رخ داده که از نظر ژئومتری، رگه‌ها با طول متوسط ۱۵۰ متر و ضخامت متغیر ۰/۵ تا ۳ متر در شکستگی‌های محلی با راستای ۷۰ تا ۱۱۰° و شیب نزدیک به قائم ۷۰ تا ۸۰° تشکیل شده‌اند (شکل ۲ب). هم‌چنین رگه-رگچه‌های متعددی از فلئوریت با ضخامت کمتر از ۵۰ سانتی‌متر در بخش‌های مختلف دیده می‌شود که به‌ویژه در دهانه تونل اصلی منطقه قابل مشاهده هستند (شکل ۲پ). فلئوریت و باریت به‌عنوان کانی‌های اصلی، بیش از ۷۰ درصد حجم رگه‌ها را به‌خود اختصاص داده‌اند که ساخت و بافت‌های پرکننده فضای خالی، برشی، حفره‌ای (cavity) و دانه پراکنده در کان‌سنگ آن‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۳). کانی‌های فلزی هم‌اتیت، گالن، پیریت و کالکوپیریت نیز با فراوانی نسبی کمتر از ۵ درصد به‌صورت دانه پراکنده و پرکننده حفرات در رگه‌ها مشاهده شدند (شکل ۳).

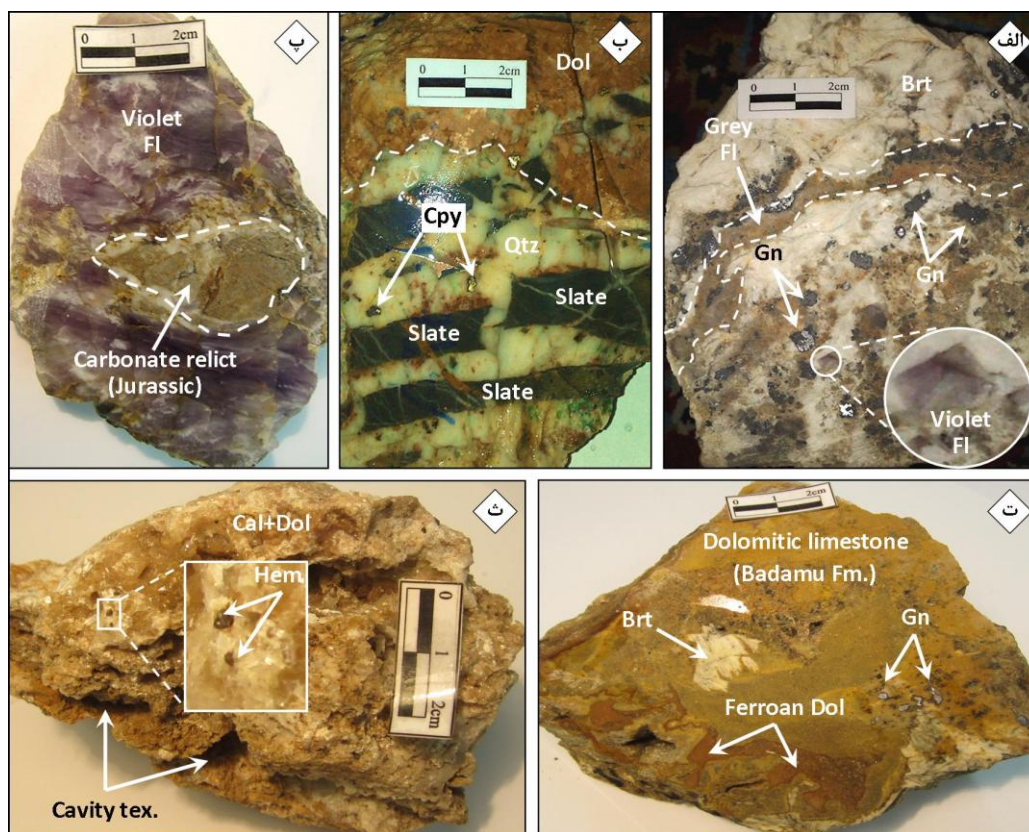


شکل ۲. تصاویر صحرایی از بخش‌های مختلف کانسار آتش‌کوه شامل، (الف) رگه عدسی‌شکل فلئوریت در میزبان اسلیت‌های سازند شمشک، (ب) رگه فلئوریت بنفش و بی‌رنگ در مجاورت سنگ میزبان اسلیتی ژوراسیک، (پ) نمایی از دهانه تونل اصلی منطقه با حضور رگه-رگچه‌های فلئوریت که در نتیجه عملکرد گسل‌های محلی با راستای ESE-WNW دچار جابجایی شده‌اند (دید به سمت شرق).

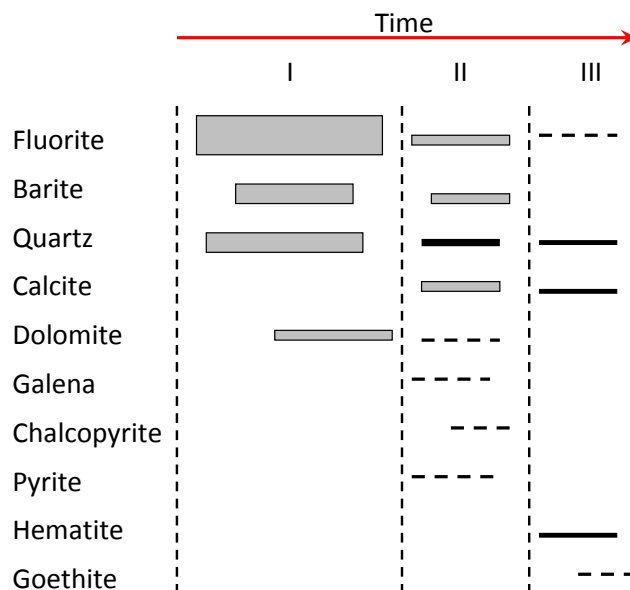
کانی‌شناسی، دگرسانی و توالی پاراژنتیک

چنان‌که اشاره شد از دیدگاه کانی‌شناسی، بخش اعظم رگه‌ها را کانی‌های فلئوریت و باریت تشکیل می‌دهد که به‌همراه آن‌ها کانی‌های فرعی کوارتز، کلسیت، دولومیت، گالن، کالکوپیریت، پیریت، هم‌اتیت و گوتیت حضور دارند. طبق

مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی، دست کم سه مرحله کانی‌سازی در رگه‌های فلئوریت-باریت-سولفید منطقه آتش‌کوه تشخیص داده شد که در توالی پاراژنتیک (شکل ۴)، این مراحل نشان داده شده است. براین اساس، کانی‌سازی فلئوریت با رنگ‌های بنفش، بی‌رنگ و خاکستری در سه مرحله تشکیل شده است (شکل ۴). مرحله نخست به‌عنوان مرحله اصلی کانی‌سازی، متشکل از کانی‌های فلئوریت، باریت و کوارتز است که در آن فلئوریت و باریت به‌صورت درهم‌رشدی در کنار یک‌دیگر تشکیل شده و بلورهای کوارتز با ابعاد متوسط تا درشت در فضای اطراف آن‌ها و سنگ‌میزبان کانسار تشکیل شده‌اند (شکل ۵ الف). طبق بررسی‌ها، بیش از ۸۰ درصد کانی‌سازی فلئوریت در منطقه آتش‌کوه در مرحله نخست انجام شده و طی این مرحله قطعاتی از سنگ‌میزبان کربناته ژوراسیک نیز به‌وسیله رگه دربرگرفته شده است (شکل ۳ پ). کانی‌سازی مرحله دوم با حضور کانی‌های غیرفلزی فلئوریت، کلسیت، باریت و کوارتز و فلزی گالن، کالکوپیریت، پیریت و هماتیت رخ داده است. کانی‌سازی سولفیدی در این مرحله اغلب به‌صورت اذخال در میزبان کان‌سنگ غیرفلزی مرحله نخست مشاهده می‌شود (شکل‌های ۳ و ۵ ب). فلئوریت (II) در این مرحله اغلب به‌صورت رورشدی روی فلئوریت (I) تشکیل شده و کوارتز (II) و باریت (II) اغلب به‌صورت سیمان برشی فضای اطراف کانی‌های نسل اول را اشغال کرده‌اند (شکل ۵ پ). کلسیت (I) نیز در



شکل ۳. تصاویر نمونه دستی از بافت و ساخت‌های کانی‌سازی در منطقه آتش‌کوه شامل، الف) کان‌سنگ توده‌ای باریت متشکل از بلورهای پراکنده فلئوریت بنفش و رگه فلئوریت خاکستری که در زمینه آن ذرات پراکنده گالن مشاهده می‌شود، ب) بافت برشی کان‌سنگ در منطقه شامل سیمان سیلیسی حاوی ذرات پراکنده کالکوپیریت و قطعات پراکنده سنگ‌میزبان ژوراسیک در آن، پ) باقی‌مانده سنگ‌میزبان کربناته ژوراسیک در مرکز رگه فلئوریت بنفش، ت) ذرات پراکنده باریت و گالن در میزبان آهک‌دولومیتی سازند بادامو که در حاشیه آن دولومیت‌های آهن‌دار قرمز مشاهده می‌شود، ث) بافت حفره‌ای (Cavity) در رگه کلسیت و دولومیت به همراه بلورهای پراکنده هماتیت. حروف اختصاری کانی‌ها: Brt-باریت، Gn-گالن، Fl-فلئوریت، Dol-دولومیت، Qtz-کوارتز، Cpy-کالکوپیریت، Cal-کلسیت، Hem-هماتیت



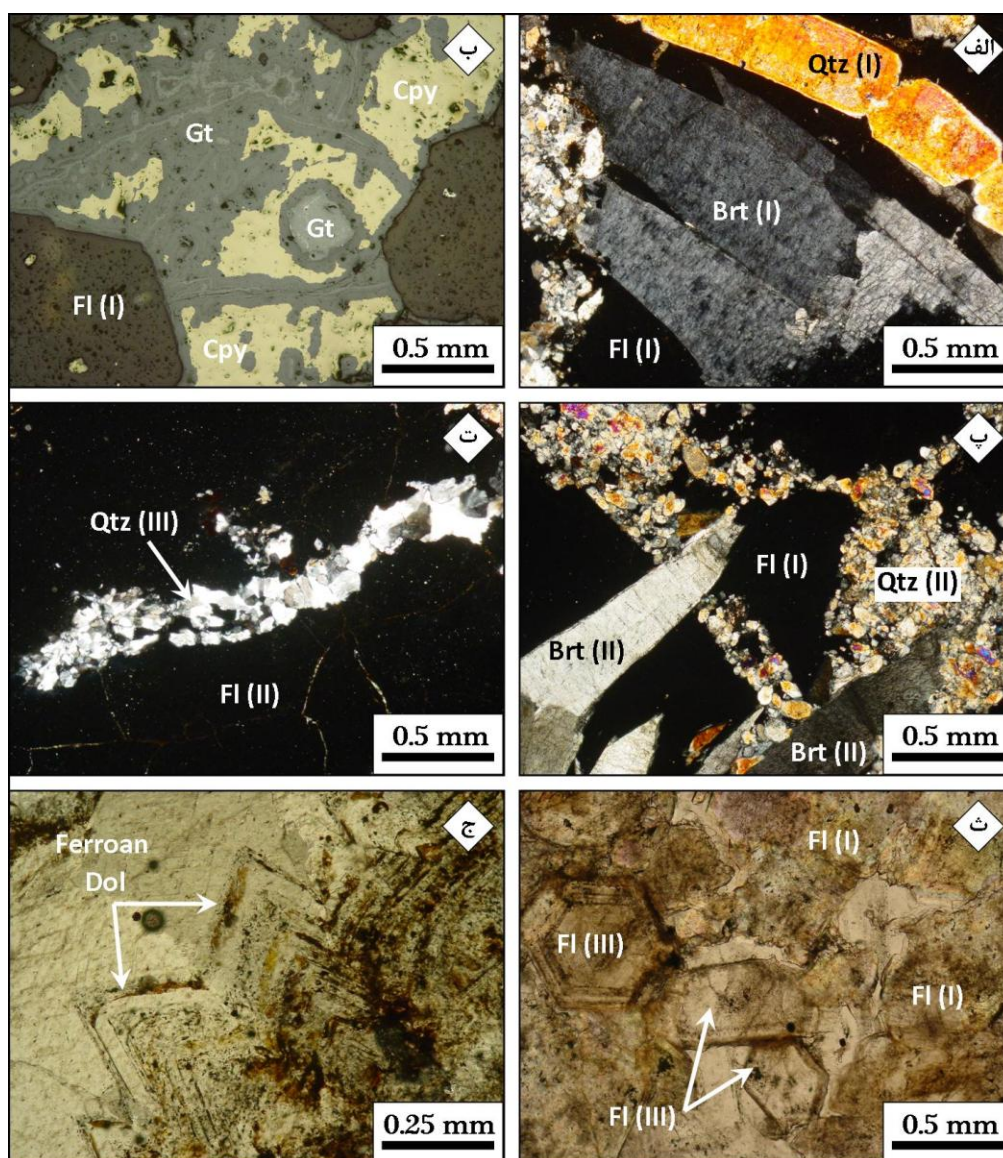
شکل ۴. مراحل زمانی تشکیل کانی‌ها در رگه‌های فلوتوریت-باریت-سولفید کانسار آتش‌کوه (ضخامت خطوط نشان‌دهنده فراوانی نسبی کانی‌ها است)

این مرحله به صورت بلورهای متوسط تا درشت به همراه رگه کانه‌ساز مشاهده می‌شود. کانی‌سازی مرحله سوم متشکل از کانی‌های کلسیت و کوارتز و مقادیر ناچیز فلوتوریت، دولومیت و باریت رخ داده است. در این مرحله رگه-رگه‌های کوارتز (III) و کلسیت (II) کانی‌سازی مرحله دوم را قطع کرده‌اند (شکل ۵ ت). هم‌چنین، کانی‌سازی فلوتوریت (III) نیز به صورت بلورهای خودشکل، فضای خالی و حفرات فلوتوریت‌های (I) را پر کرده (شکل ۵ ث) و باریت (III) نیز به صورت رشته‌ای در میزبان فلوتوریت مشاهده می‌شود. هم‌چنین طی بررسی‌ها، دولومیت‌های آهن‌دار (ferroan dolomite) [۲۶] نیز اغلب همراه کانی‌سازی مرحله نخست تشخیص داده شد (شکل ۵ ج). طبق شواهد، کم‌تر از ۲۰ درصد کانی‌سازی فلوتوریت طی مراحل دوم و سوم رخ داده است. دگرسانی‌های دولومیتی، سیلیسی (کوارتز و کلسدون) و آرژیلیک (کائولینیت و ایلیت) به ترتیب فراوانترین دگرسانی‌های همراه رگه هستند. دگرسانی‌های سیلیسی و دولومیتی در مجاورت رگه‌های کانه‌ساز و دگرسانی آرژیلیک اغلب در سنگ‌میزبان کانی‌سازی و با فاصله از رگه رخ داده است. مهم‌ترین کانی‌های دگرسان مشاهده شده در اطراف رگه‌ها شامل کوارتز، سریسیت، آلبیت، کانی‌های رسی، کلریت، تالک، دولومیت و کلسیت هستند.

میانبارهای سیال

سنگ‌نگاری

در این پژوهش، رده‌بندی سنگ‌نگاری میانبارها در دمای اتاق (25°C) و بر مبنای معیارهای ارائه شده [۲۷]، [۲۸] انجام شد. برای درک صحیح از خصوصیات فیزیکوشیمی و دستیابی به شرایط فشار-دمای سیال طی مراحل مختلف کانه‌زایی، بررسی میانبارها با استفاده از کانی‌های فلوتوریت (I)، باریت (II) و کوارتز (III)، انجام شد (شکل ۴). بر این اساس، سه نوع میانبار به ترتیب فراوانی شامل، (۱) میانبارهای آبگین غنی از مایع با حجم حباب گاز کم‌تر از ۵۰ درصد ($L+V$)، (۲) میانبارهای آبگین حاوی فاز جامد ($L+V+S$) و (۳) میانبارهای حاوی فاز CO_2 (L_1+L_2+V)، از هم تفکیک شدند (شکل ۶). علاوه بر این، میانبارهای تک فاز مایع (L) و گاز (V) نیز در نمونه‌ها تشخیص داده شد که از لحاظ ریزدماسنجی بررسی نشدند.



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی نوری از بخش‌های مختلف کانی‌سازی رگه‌ای در منطقه شامل، الف) درهم‌رشدی کانی‌های باریت (I)، کوارتز (II) و فلونئوریت (III) مرحله نخست کانی‌سازی، ب) کانی‌سازی سولفیدی کالکوپیریت به همراه جانشینی گوتیت در میزبان فلونئوریت (I)، پ) فلونئوریت‌های برشی نسل اول که با تیغه‌های کشیده باریت (II) و تجمعات بلوری کوارتز (II) قطع شده است، ت) قطع شدن فلونئوریت (II) به وسیله رگچه کوارتز (III)، ث) کانی‌سازی فلونئوریت خودشکل (III) در فضای خالی فلونئوریت‌های مرحله نخست (I) و ج) تشکیل دولومیت‌های آهن‌دار (ferroan dolomite) در مرحله نخست کانی‌سازی. حروف اختصاری

کانی‌ها: Brt-باریت، FI-فلونئوریت، Dol-دولومیت، Qtz-کوارتز، Cpy-کالکوپیریت، Gt-گوتیت

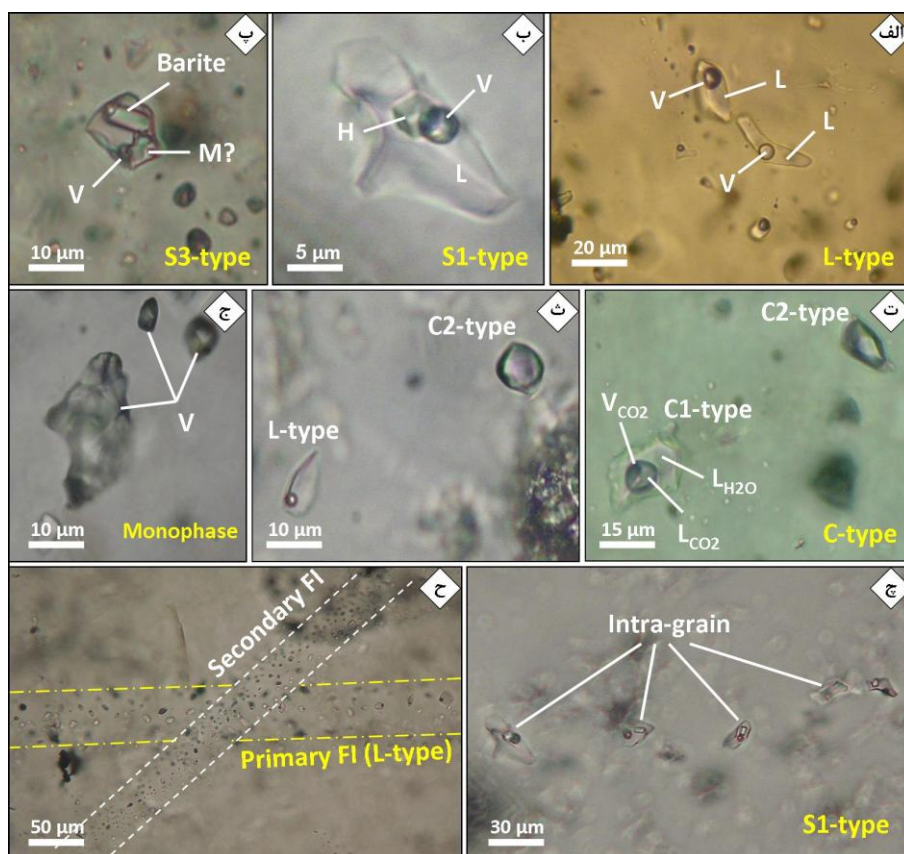
میانبارهای آبگین غنی از مایع (ترکیب کلی L+V) با درجهٔ پرشدگی بین ۵۰ تا ۸۰ درصد و فراوانی نسبی ۷۰ درصد، در کانی‌های فلونئوریت، باریت و کوارتز مراحل مختلف تشخیص داده شد (جدول ۱). اندازهٔ این میانبارها اغلب بین ۳ تا ۵۰ میکرون تشخیص داده شد که حجم فاز بخار در آن‌ها اغلب کمتر از ۵۰ درصد است (شکل ۶ الف). این میانبارها با ماهیت اولیه در مرکز بلور و ثانویه (قطع‌کننده مرز بلور) مشاهده شدند که با اندازه‌گیری میانبارهای اولیه، همگی آن‌ها طی گرمایش به فاز مایع همگن شدند. میانبارهای آبگین حاوی فاز جامد (ترکیب کلی L+V+S) با حضور کانی‌های هالیت، سیلویت و

کانی‌های شفاف دیگر، پس از میانبارهای آبگین غنی از مایع با فراوانی تقریبی ۲۰ درصد، تنها در فلوتوریت‌های مرحله کانی‌سازی اصلی (I) مشاهده شد. اندازه تقریبی میانبارهای آبگین حاوی فاز جامد بین ۵ تا ۲۵ میکرون و حجم حباب گاز کم‌تر از ۳۰ درصد تشخیص داده شد که اغلب به‌صورت اولیه با موقعیت درون‌بلوری^۱ مشاهده شد (شکل ۶ ب). کانی‌های شفاف در این میانبارها با ظاهر کشیده و بی‌فرزئانس ضعیف تا متوسط است که با استفاده از ملاک‌های معرفی شده [۲۹] به‌عنوان فاز نوزاد باریت تشخیص داده شد (شکل ۶ پ). بر اساس نوع کانی‌های جامد، سه زیرگروه از میانبارهای آبگین حاوی فاز جامد شامل، (۱) حاوی کانی‌های هالیت با ترکیب $L+V+S_{NaCl}$ (S1-type)، (۲) حاوی کانی‌های هالیت و سیلویت با ترکیب $L+V+S_{NaCl}+S_{KCl}$ (S2-type) و (۳) حاوی کانی‌های شفاف دیگر با ترکیب $L+V+S_{Minerals}$ (S3-type)، تشخیص داده شد. میانبارهای حاوی فاز CO_2 یا کربنیک (ترکیب کلی $L+L_2+V$)، با فراوانی تقریبی ۱۰ درصد و فاز حباب تیره نسبت به میانبارهای آبگین غنی از مایع و حاوی فاز جامد، در کانی‌های فلوتوریت (I) و کوارتز (III) تشخیص داده شد (جدول ۱). میانبارهای حاوی فاز کربنیک اغلب به‌صورت اولیه همراه با میانبارهای آبگین غنی از مایع مشاهده شده که اندازه آن‌ها بین ۱ تا ۳۰ میکرون در تغییر است. این دسته از میانبارها در منطقه آتش‌کوه شامل دو زیرگروه، (۱) آبگین-کربنیک با ترکیب $L_{H_2O}+L_{CO_2}+V_{CO_2}$ (C1-type) و (۲) میانبارهای کربنیک با ترکیب $L_{CO_2}+V_{CO_2}$ (C2-type) هستند.

ریزدماسنجی

طی مطالعات ریزدماسنجی در میانبارهای آبگین (Aqueous) دوفازی و سه فازی (دارای فاز جامد)، دمای اولین نقطه ذوب یخ (T_e)، دمای همگن‌شدن نهایی T_h (total) و فاز بخار T_h (LV)، دمای انحلال فاز پایدار هالیت T_m (Halite) و نیمه‌پایدار هیدروهالیت T_m (Hydrate) و دمای نهایی ذوب یخ T_m (Ice)، اندازه‌گیری شد. همچنین در میانبارهای کربنیک حاوی فاز CO_2 ، مقادیر دمای ذوب کلتریت T_m (Clath)، دمای ذوب CO_2 T_m (CO_2) و دمای همگن‌شدن فاز کربنیک T_h (CO_2)، ثبت شدند. برای جلوگیری از طولانی‌شدن نوشتار از حروف اختصاری دمای میانبارها در این مقاله استفاده شده است. تعبیر و تفسیر داده‌های ریزدماسنجی شامل ترکیب، چگالی (کل و فاز کربنیک) و فشار، با استفاده از نرم‌افزارهای FLINCOR [۳۰] و FLUIDS [۳۱]، انجام شد. محاسبه شوری در میانبارهای آبگین دوفازی بدون فاز جامد با دمای یوتکتیک بیش از $-21/2^\circ C$ با استفاده از T_m (Ice) و بهره‌گیری از معادله [۳۲] و مقایسه با روش [۳۳] انجام شد. محاسبه شوری در میانبارهای حاوی فاز جامد هالیت نیز با استفاده از مقادیر T_m (Halite) و بهره‌گیری از نرم‌افزار SALTY [۳۴] و مقایسه با روش [۳۵]، انجام شد. همچنین در میانبارهای آبگین حاوی فاز نیمه‌پایدار هیدروهالیت نیز محاسبه شوری از طریق مقادیر T_m (Hydrate) و استفاده از نرم‌افزار Calcic Brine [۳۶]، صورت گرفت. محاسبه شوری در میانبارهای آبگین-کربنیک حاوی کلتریت (در سامانه H_2O-CO_2-NaCl)، نیز با T_m (Clath) و به‌کارگیری روش [۳۷] در نرم‌افزار FLINCOR انجام شد. داده‌های به‌دست آمده از پژوهش‌های ریزدماسنجی در جدول ۱ آورده شده است. دماهای اندازه‌گیری شده محدود به حد بالایی $450^\circ C$ هستند.

1. intra-grains



شکل ۶. نمایی از انواع میانبارهای سیال در میزبان فلئوریت کانسار آتش کوه شامل، الف) میانبارهای دو فازی آبگین غنی از مایع (L-type)، ب) میانبار حاوی فاز جامد هالیت (S1-type)، پ) میانبار حاوی فاز جامد باریت و کانی شفاف ناشناخته (S3-type)، ت) اجتماع میانبارهای کربنیک (C2-type) و آبگین-کربنیک (C1-type) در کنار هم، ث) حضور میانبارهای کربنیک (C2-type) و آبگین غنی از مایع (L-type)، ج) اجتماع میانبارهای تک فاز بخار (V)، چ) ردیفی از میانبارهای اولیه حاوی فاز جامد هالیت (S1-type)، ح) ردیفی از میانبارهای اولیه غنی از مایع اولیه (L-type) که به وسیله ردیفی از میانبارهای کوچکتر از ۵ میکرون ثانویه قطع شده است. حروف اختصاری: L-فاز مایع، V-فاز بخار، H-هالیت، M-کانی شفاف ناشناخته، FI-میانبار سیال

جدول ۱. خلاصه‌ای از نتایج داده‌های ریزدماسنجی میانبارهای سیال در میزبان کانی‌های فلئوریت، باریت و کوارتز مراحل مختلف کانه‌زایی

چگالی کل (g/cm ³)	شوری @	T _h (total)	T _h (CO ₂)	T _m (Hydrate)	T _m (Ice)*	n	نوع میانبار	کانی میزبان
۱/۱۰-۰/۹۶	۱۳/۶-۷/۷	۲۰۵-۹۰	-----	-----	-۴/۹ تا -۹/۷	۳۰	L1	فلئوریت (I)
۱/۱۱-۱/۰۳	۲۳/۰-۱۸/۳	۱۵-۸۰	-----	-۲۶ تا -۳۰/۵	-۱۵/۳ تا -۲۳/۷	۳۵	L2	
۱/۱۵-۱/۱۰	۳۹/۰-۳۱/۰	۳۴۴-۲۲۰	-----	-----	-----	۲۸	S1	
۰/۹۵-۰/۹۱	۹/۲-۵/۳	۲۱۰-۱۷۰	۱۸۸-۷/۴	-----	-----	۱۵	C1	
۰/۹۳-۰/۷۸	-----	-----	۲۹-۱۵/۵	-----	-----	۱۳	C2	
۱/۰۲-۰/۹۸	۱۰/۷-۵/۲	۲۷۰-۱۳۰	-----	-----	-۳/۳ تا -۷/۲	۳۳	L1	باریت (II)
۱/۰۳-۰/۹۹	۱۰/۵-۴/۳	۱۷۰-۹۰	-----	-۲۲/۲ تا -۲۴/۸	-۱۸/۵ تا -۲۲/۵	۳۰	L2	
۱/۰۷-۰/۹۵	۷/۵-۳/۲	۱۱۰-۱۹۳	-----	-----	-۲/۰ تا -۴/۸	۲۳	L1	کوارتز (III)
۱/۰۱-۰/۹۶	۶/۷-۳/۰	۲۸۰-۱۹۵	۲۷/۵-۱۳/۴	-----	-----	۲۰	C1	
۰/۸۸-۰/۷۵	-----	-----	۲۲/۷-۱۰/۵	-----	-----	۱۱	C2	

* مقادیر دما بر حسب درجه سانتی‌گراد (C°) است. n - تعداد نقاط اندازه‌گیری

@ مقادیر شوری در تمام میانبارها بر حسب درصد معادل نمک طعام (wt% NaCl eq.) و در میانبارهای حاوی هیدروهاالیت نوع L2 بر حسب درصد معادل نمک طعام + کلرید کلسیم (wt% NaCl+CaCl₂ eq.) است.

میانبارهای آبگین غنی از مایع (L+V)

بر مبنای پژوهش‌های ریزدماسنجی، دو زیرگروه از میانبارهای آبگین غنی از مایع از یکدیگر تشخیص داده شد که خصوصیات آن‌ها بدین شرح است:

میانبارهای L1: این دسته از میانبارها در هر سه کانی فلئوریت، باریت و کوارتز تشخیص داده شد. دمای نخستین نقطه ذوب یخ (T_e) در این گروه بین 25°C تا 22°C ثبت شد که گویای حضور یون‌های Fe^{2+} ، Mg^{2+} و Ca^{2+} و تشکیل در سامانه $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}\pm\text{KCl}$ است [۲۹]. به‌طور کلی، دمای نهایی ذوب یخ یا $T_m(\text{Ice})$ در این میانبارها بین $9/7^{\circ}\text{C}$ تا 2°C برابر شوری $3/2$ تا $13/6$ درصد وزنی معادل NaCl است. دمای همگن شدن در این میانبارها بین 90°C تا 270°C به‌دست آمد (شکل ۷).

میانبارهای L2: این میانبارها در کانی‌های فلئوریت و باریت تشخیص داده شد که مقدار T_e در آن‌ها بین 65°C تا 45°C ثبت شد. مشاهده رنگ قهوه‌ای تا زرد فاز یخ در دمای 100°C و دمای یوتکتیک پایین این میانبارها، گویای تشکیل آن‌ها در سامانه $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ و حضور فاز نیمه‌پایدار هیدروهلایت ($\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) در ترکیب آن‌هاست [۲۸]. براین اساس، دمای ذوب هیدروهلایت یا $T_m(\text{Hydrate})$ بین $30/5^{\circ}\text{C}$ تا 26°C و تغییرات $T_m(\text{Ice})$ نیز بین $23/7^{\circ}\text{C}$ تا $15/3^{\circ}\text{C}$ در فلئوریت‌ها ثبت شد (جدول ۱). با استفاده از پیاده کردن این داده‌ها در نمودار سه‌تایی $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ [۲۹]، شوری کل برابر $18/3$ تا 23 درصد وزنی معادل $\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$ از این میانبارها به‌دست آمد (شکل ۸).

تغییرات $T_m(\text{Ice})$ و $T_m(\text{Hydrate})$ نیز در باریت‌های منطقه به‌ترتیب بین $24/8^{\circ}\text{C}$ تا $22/2^{\circ}\text{C}$ و $22/5^{\circ}\text{C}$ تا $18/5^{\circ}\text{C}$ ثبت شد که شوری کل محاسبه شده از این داده‌ها، برابر $4/3$ تا $10/5$ درصد وزنی معادل $\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$ به‌دست آمد (شکل ۷). براین اساس، نسبت وزنی $\text{NaCl}/\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$ در میانبارهای فلئوریت بین $0/3$ تا $0/5$ و باریت بین $0/6$ تا $0/9$ به‌دست آمد که گویای وجود مقادیر بالای Na^+ در ترکیب باریت‌های منطقه است (شکل ۷ الف و ب). این مطلب در نمودار سه‌تایی $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ رسم شده در شکل ۸ نیز قابل مشاهده است. تغییرات $T_h(\text{total})$ در میانبارهای حاوی هیدروهلایت (نوع L2) موجود در فلئوریت بین 80°C تا 150°C (با مد 100°C) و در میزبان باریت بین 90°C تا 170°C (با مد 140°C)، ثبت شد (جدول ۱).

میانبارهای آبگین حاوی فاز جامد (L+V+S)

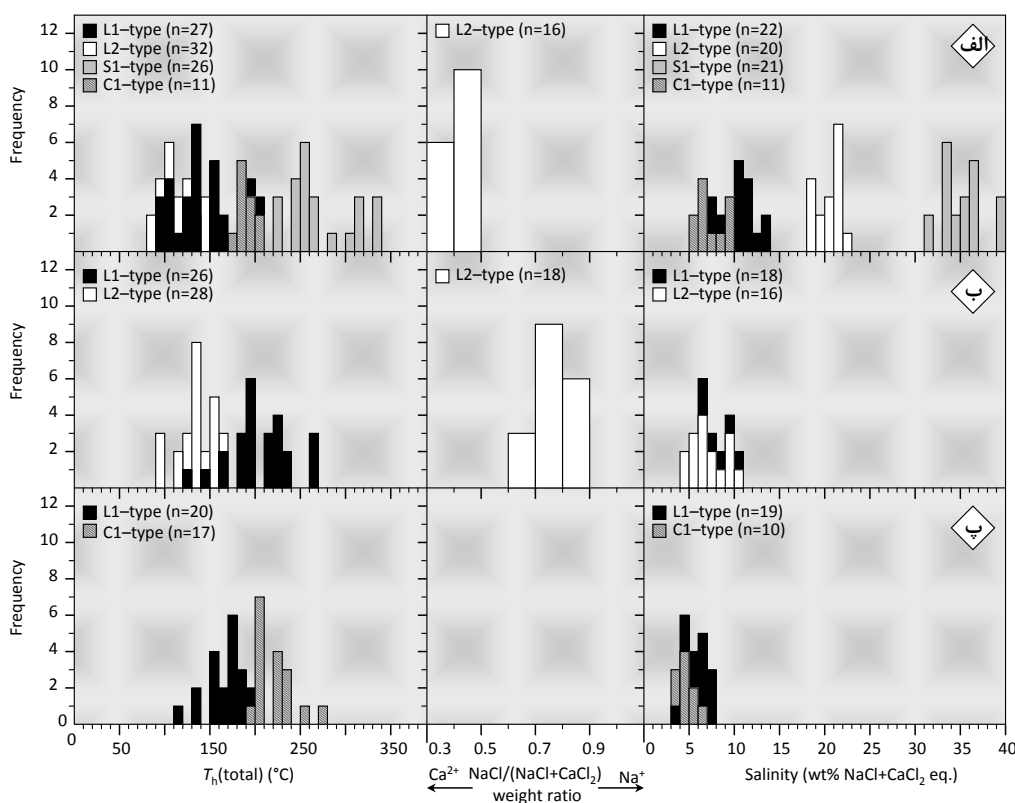
چنان‌که اشاره شد سه زیرگروه از میانبارهای آبگین حاوی فاز جامد شامل، میانبارهای حاوی کانی هالیت (S1-type)، حاوی کانی‌های هالیت و سیلویت (S2-type) و حاوی کانی‌های شفاف دیگر (S3-type)، تشخیص داده شد. به‌دلیل اندازه مناسب، پژوهش‌های میکروترمومتری اغلب روی زیرگروه اول انجام شد.

میانبارهای S1: تغییرات دمای ذوب هالیت یا $T_m(\text{Halite})$ در این میانبارها بین 185°C تا 312°C ثبت شد که شوری محاسبه شده بر مبنای آن بین 31 تا 39 درصد معادل NaCl به‌دست آمد (شکل ۷ الف). دمای همگن شدن حباب‌گاز یا $T_h(\text{LV})$ به فاز مایع، در این میانبارها بین 220°C تا 344°C (با مد 252°C) ثبت شد. طبق پژوهش‌ها، دمای همگن شدن نهایی یا $T_h(\text{total})$ در میانبارهای S1 با از بین رفتن فاز حباب‌گاز انجام شد ($T_{hLV} > T_{m\text{Halite}}$).

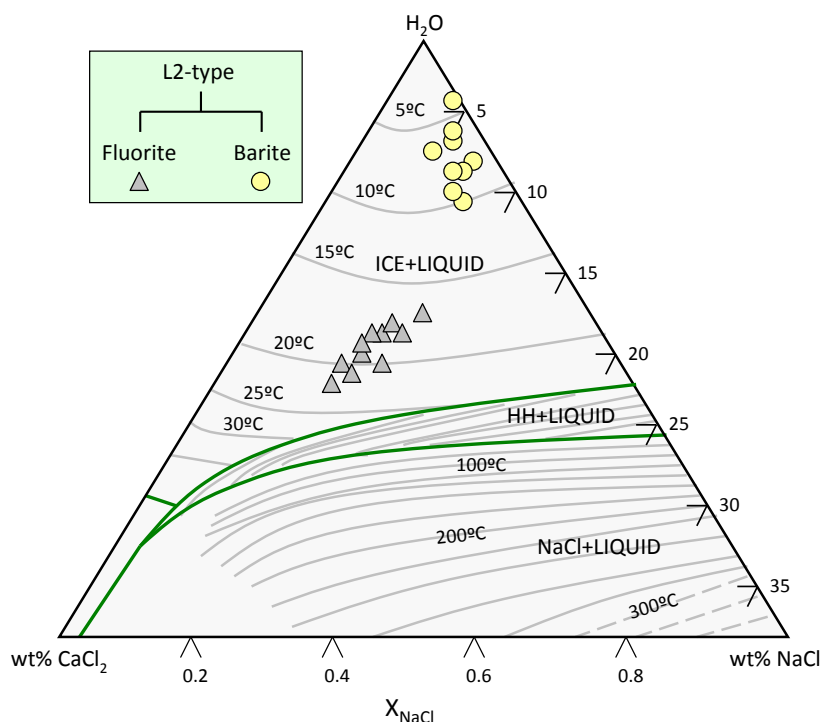
میانبارهای حاوی فاز کربنیک (L1+L2+V)

میانبارهای C1: با حجم فاز کربنیک بین ۳۰ تا ۶۰ درصد حجمی (vol.%)، حجم مایع آبگین کم‌تر از ۴۰ درصد حجمی و حجم حباب بخار کم‌تر از ۵۰ درصد تشخیص داده شد که طی گرمایش، فاز کربنیک این میانبارها به فاز مایع همگن شدند (شکل ۶ت). دمای ذوب فاز کربنیک یا $T_m(\text{CO}_2)$ در این میانبارها بین $58/5^\circ\text{C}$ تا $57/2^\circ\text{C}$ ثبت شد که وجود مقادیر CH_4 و N_2 را نشان می‌دهد [۳۸]. دمای همگن شدن فاز CO_2 یا $T_h(\text{CO}_2)$ نیز در این میانبارها بین $7/4^\circ\text{C}$ تا $27/5^\circ\text{C}$ به دست آمد (جدول ۱). شوری محاسبه شده بر مبنای دمای ذوب فاز نیمه پایدار کلتريت یا $T_m(\text{Clath})$ ($4/8^\circ\text{C}$ تا $8/5^\circ\text{C}$)، بین ۳ تا $9/2$ درصد معادل NaCl به دست آمد. همچنین تغییرات $T_h(\text{total})$ در میانبارهای C1 موجود در کانی‌های فلونوریت بین 170°C تا 210°C (با مد 185°C) و کوارتز بین 195°C تا 280°C (با مد 205°C) ثبت شد (شکل ۷ الف و پ).

میانبارهای C2: این میانبارها با فاز کربنیک ۱۰۰ درصد حجمی، در دمای $58/5^\circ\text{C}$ تا $57/2^\circ\text{C}$ دچار ذوب شدند (شکل ۶ ث). $T_h(\text{CO}_2)$ در این میانبارها بین $10/5^\circ\text{C}$ تا 29°C به دست آمد و به دلیل عدم تشکیل کلتريت، شوری در این میانبارها ثبت نشد.



شکل ۷. نمودار هیستوگرام مقادیر شوری، نسبت وزنی $\text{NaCl}/(\text{NaCl}+\text{CaCl}_2)$ و دمای همگن شدن نهایی سیال یا $T_h(\text{total})$ در میانبارهای موجود در کانی‌های الف) فلونوریت (I)، ب) باریت (II) و پ) کوارتز (III)



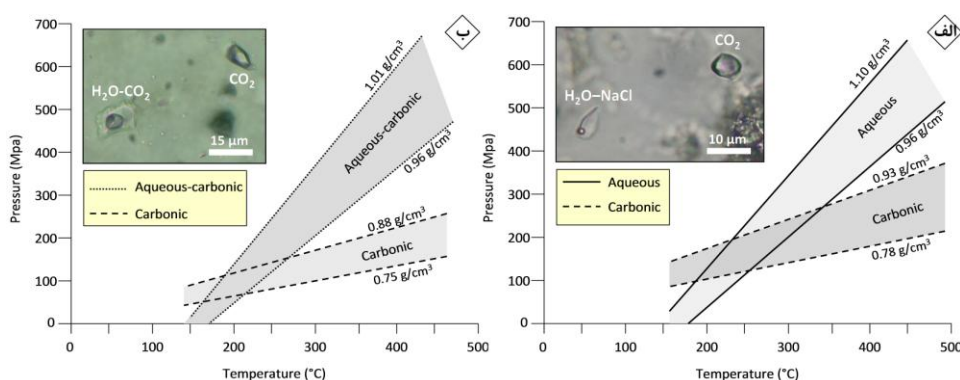
شکل ۸. نمودار سه تایی $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2-\text{NaCl}$ [۳۹] که در آن موقعیت میانبارهای حاوی فاز نیمه پایدار هیدرومالیت (نوع L2) در کانی‌های فلوئوریت و باریت نشان داده شده است

بحث و بررسی

تخمین شرایط فشار-دما

در کانسار فلوئوریت-باریت آتش کوه دست‌یابی به شرایط فشار-دمای واقعی و تخمین عمق دیرینه کانسار از طریق حضور هم‌زمان اجتماعی از میانبارهای اولیه (Fluid Inclusion Assemblage) نوع C و L در ساختمان کانی‌های فلوئوریت (I) و کوارتز (III) با سامانه $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ امکان‌پذیر است. از آن‌جاکه شیب ایزوکوره‌های فشار-دما به دست آمده برای میانبارهایی با ماهیت آبگین (بدون حضور CO_2)، آبگین-کربنیک و کربنیک با یک‌دیگر متفاوت است، از این رو، روابط متقاطع میان این ایزوکورها می‌تواند تخمین مناسبی از شرایط فشار و دمای سیال به دام افتاده در اختیار گذارد [۴۰].

قطع ایزوکورها در این روش با میانبارهای آبگین (شامل L1)، آبگین-کربنیک (شامل C1) و کربنیک (شامل C2) موجود در کانی‌های فلوئوریت و کوارتز و استفاده از مقادیر کمینه و بیشینه چگالی کل در این میانبارها انجام شده است (جدول ۱ و شکل ۹). در فلوئوریت‌ها ایزوکورها برای میانبارهای آبگین نوع L1 با استفاده از چگالی کل (bulk density) کمینه تا بیشینه بین 0.96 تا 1.10 g/cm^3 ترسیم شده است. هم‌چنین ایزوکوره‌های متقاطع دیگر برای میانبارهای نوع C1 و C2 در میزبان فلوئوریت به ترتیب برای چگالی‌های کل بین 0.91 تا 0.95 g/cm^3 و 0.78 تا 0.93 g/cm^3 با نرم‌افزار FLINCOR محاسبه شد (جدول ۱). محاسبات مذکور در کانی کوارتز نیز انجام شده و ایزوکوره‌های مرتبط با آن بر اساس مقادیر چگالی کل در سه نوع میانبار در شکل ۹ ب نشان داده شده است. چنان‌که در نمودار دوتایی دما (°C) در مقابل فشار (Mpa) شکل ۹ نشان داده شده، کانی‌سازی فلوئوریت مرحله اصلی در فشار 150 Mpa و دمای 250°C و کانی‌سازی کوارتز مرحله پایانی در فشار 100 Mpa و دمای 200°C رخ داده است.



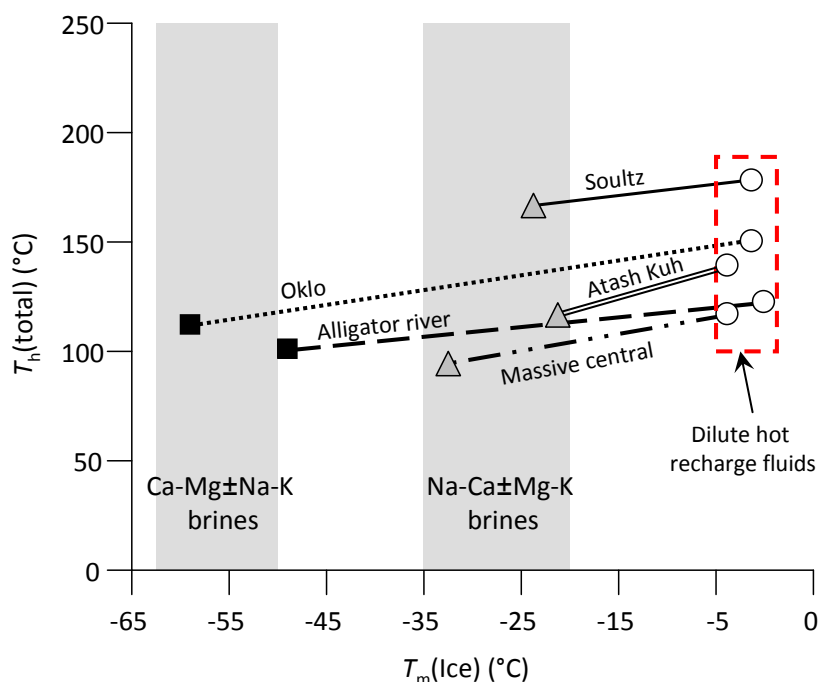
شکل ۹. نمودارهای تخمین فشار-دمای سیال با استفاده از قطع ایزوکورهای میانبرهای آبگین، آبگین-کربنیک و کربنیک در کانی‌های فلئوریت (الف) و کوارتز (ب)، (الف) رخداد کانی‌سازی فلئوریت مرحله اصلی در فشار ۱۵۰ Mpa و دمای ۲۵۰°C و (ب) کانی‌سازی کوارتز مرحله پایانی در فشار کم‌تر از ۱۰۰ Mpa و دمای ۲۰۰°C

ترکیب سیال دیرینه

در کانسارهای فلئوریت، باریت، سرب و روی و اورانیوم با سنگ میزبان کربناته که معمولاً دارای محتوای زیادی از یون‌های Na^+ ، K^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} و Fe^{2+} به همراه Cl^- هستند، برای دستیابی به ترکیب سیال کانه‌ساز از روش‌های متعددی استفاده می‌شود. از جمله روش‌های مفید برای این منظور استفاده از شواهد ریزدماسنجی (رابطه دمای همگن شدن نهایی سیال $T_h(\text{total})$ و دمای آخرین نقطه ذوب یخ $T_m(\text{Ice})$ و نسبت‌های مولار Na/Ca و Na/K در میانبرهای سیال است که در ادامه به شرح آن‌ها می‌پردازیم.

شواهد ریزدماسنجی: چنان‌که اشاره شد یکی از ویژگی‌های شاخص ذخایر فلزی و غیرفلزی با میزبان سنگ‌های کربناته، محتوای زیاد عناصر سدیم، پتاسیم و کلسیم در ترکیب میانبرها است که به‌موجب آن روندی پیوسته در محتوای کلرینیت سیال بین دو عضو انتهایی در نمودار دوتایی $T_m(\text{Ice})$ در مقابل $T_h(\text{total})$ مشاهده می‌شود (شکل ۱۰). براین اساس، عضو انتهایی به‌صورت سیالی رقیق با مقادیر $T_m(\text{Ice})$ نزدیک به صفر است و عضو دیگر با شوری زیاد و مقادیر $T_m(\text{Ice})$ بسیار اندک مشخص می‌شود. میانبرهای سیال با مقادیر متفاوت $T_m(\text{Ice})$ در اجتماعی از میانبرها (FIA) که به‌طور هم‌زمان در شکستگی‌ها و نقص‌های بلوری کانی‌های مختلف بدام افتاده‌اند، حکایت از ماهیت ناهمگنی^۱ سیال دیرینه دارد. چنین خصوصیتی به‌مراتب در ذخایر مختلف از جمله اجتماع میانبرهای شور تا بسیار رقیق بدام افتاده در رگه‌های فلئوریت-باریت کانسار Soultz (شرق فرانسه) که در فاصله زمانی کوتاه تحت تأثیر گرادیان ژئوترمال رخ داده‌اند، مشاهده می‌شود [۴۱]. هم‌چنین این ویژگی در ذخایر سرب-فلئوریت-باریت ماسیو سنترال^۲ شمال غرب فرانسه با مقادیر کم $T_m(\text{Ice})$ (در حدود -۳۲°C) و حضور سیالی شور غنی از NaCl نیز مشاهده می‌شود [۴۲] (شکل ۱۰). علاوه بر این، در ذخایر اورانیوم نوع دگرشیبی، نظیر حوضه دریاچه الیگیتور^۳ استرالیا و [۴۳] حوضه فرانسویل^۴ اوکلو (فرانسه) [۴۴] نیز موارد مشابه گزارش شده است. با پیاده کردن مقادیر $T_m(\text{Ice})$ و $T_h(\text{total})$ به‌دست آمده از ریزدماسنجی فلئوریت‌های مرحله اصلی در نموداری دوتایی، می‌توان دریافت که سیال فلئوریت‌ساز اصلی در آتش‌کوه از دو عضو انتهایی شامل بخشی بسیار رقیق با دما زیاد (میانبرهای نوع L1 با $T_m(\text{Ice})$ متوسط -۵°C) و بخشی غنی از نمک نسبتاً کم‌دما (میانبرهای L2 با $T_m(\text{Ice})$ متوسط

1. Heterogeneity
2. Massive Central
3. Alligator River
4. Franceville



شکل ۱۰. مقایسه از تباط مقادیر $T_m(\text{Ice})$ و $T_h(\text{total})$ در تعدادی از ذخایر اپی ژنتیک فلئوریت-باریت (اورانیوم، سرب و روی) [۴۱-۴۴] که روند کلرینیت پیوسته‌ای در اعضای انتهایی سیال را نشان می‌دهند. چنان‌که مشاهده می‌شود این روند در سیال فلئوریت‌ساز منطقه آتش‌کوه، بین یک عضو انتهایی غنی از نمک با مقادیر $T_m(\text{Ice})$ تقریبی 20°C - و یک عضو رقیق‌شده نسبتاً داغ با $T_m(\text{Ice})$ متوسط 5°C - در تغییر است.

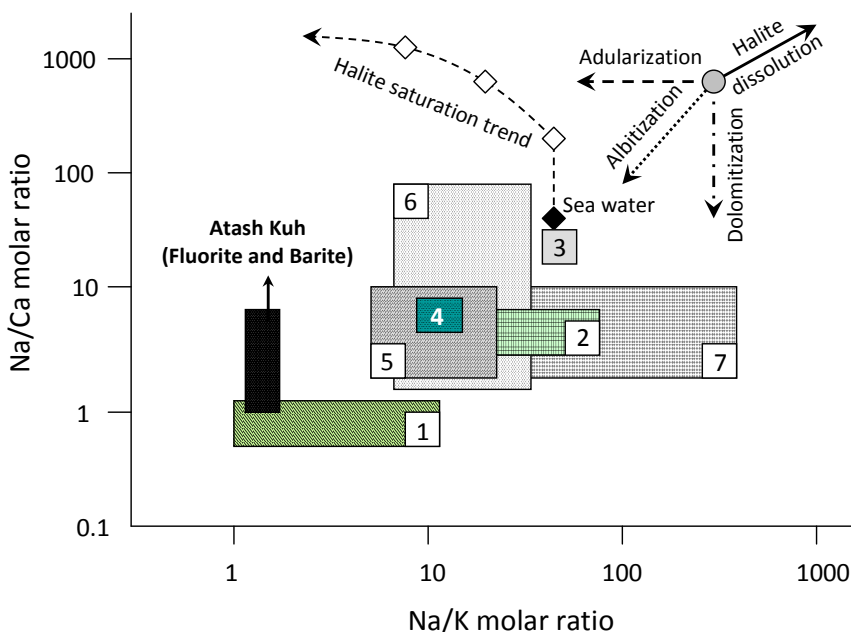
20°C - تشکیل شده است (شکل ۱۰). چنان‌که مشاهده می‌شود عضو انتهایی غنی از نمک در محدوده شورابه‌های حاوی Na-Ca (\pm Mg-K) قرار می‌گیرد.

نسبت‌های مولار: استفاده از نسبت‌های مولار Na/Ca، Na/K و Cl/Br به‌عنوان روشی کارآمد در دست‌یابی به ترکیب شیمی میانبارهای سیال و محتوای فلزی آن‌ها به‌حساب می‌آید که به‌ویژه در ذخایر با محتوای NaCl زیاد اهمیت بیشتری دارد. به عقیده [۴۵] ذخایر با محتوای کلرینیت بالا قادرند مقادیر بیش‌تری فلز از ساختمان سنگ‌های مجاور شستشو داده و باعث افزایش عیار کان‌سنگ شوند. این نسبت‌ها با استفاده از آزمایش‌های LA-ICP-MS، Crush leach و محاسبه مقادیر شوری در میانبارهای سیال، قابل دست‌یابی است. در این پژوهش، از درصد وزنی معادل NaCl، CaCl_2 و KCl به‌دست آمده از شوری میانبارهای نوع L2 ($\text{wt\% NaCl} + \text{CaCl}_2$) و S ($\text{wt\% NaCl} + \text{KCl}$)، استفاده شده که به نسبت مولار Na، Ca و K تبدیل شدند. نتایج این نسبت‌ها در جدول ۲ آورده شده است. در ترکیب میانبارهای سیال ذخایر اپی ژنتیک فلئوریت-باریت (\pm سرب و روی) با میزبان کربناته، اغلب نسبت‌های مولار Na/K و Na/Ca کمی گزارش شده است [۴۵]. برای این مینا، ترکیب سیال دیرینه در اغلب این ذخایر با نسبت مولار Na/K کمتر از ۵۰ و Na/Ca بین ۱ تا ۴۰ مشخص می‌شود (شکل ۱۱). در کانسار آتش‌کوه، نسبت مولار Na/Ca باریت‌های نسل دوم (II) در میانبارهای آبگین دارای هیدروهالیت (نوع L2) بین ۴/۵ تا ۷ و نسبت مولار Na/K فلئوریت‌ها در میانبارهای آبگین حاوی فاز جامد، بین ۱/۵ تا ۲ به‌دست آمد (جدول ۲). با قطع دادن این نسبت‌ها در نمودار دوتایی Na/K در مقابل Na/Ca مولار، موقعیت نمونه‌ها در نزدیکی شورابه‌های غنی از Ca قرار می‌گیرد [۴۶] (شکل ۱۱).

جدول ۲. محاسبه مقادیر مولار عناصر Na، K و Ca با استفاده از شوری میانبارهای آبگین حاوی هیدروها لیت (نوع L2) و میانبارهای آبگین حاوی فاز جامد (نوع S)

میانبارهای آبگین حاوی فاز جامد (نوع S)		میانبارهای آبگین حاوی هیدروها لیت (نوع L2)				نوع میانبار
نرم افزار SALTY [۲۹]		نرم افزار Calcic Brine [۳۱]				روش محاسبه
wt% KCl eq.	wt% NaCl eq.	wt% CaCl ₂ eq.		wt% NaCl eq.		نوع نمک
فلوئوریت	فلوئوریت	باریت	فلوئوریت	باریت	فلوئوریت	کانی میزبان
۱۹/۸۹-۱۷/۱۶	۲۸/۸۶-۱۹/۴۳	۳/۷۳-۱/۰۲	۱۶/۴۵-۹/۰۹	۷/۶۴-۳/۷۳	۹/۲۴-۶/۵۳	تغییرات شوری
-----	۰/۵-۰/۳۳	-----	-----	۰/۱۳-۰/۰۷	۰/۱۶-۰/۱۲	Na مولار
-----	-----	۰/۰۳-۰/۰۱	۰/۱۵-۰/۰۸	-----	-----	Ca مولار
۰/۲۵-۰/۲۲	-----	-----	-----	-----	-----	K مولار
-----		۴/۵ تا ۷/۰ (باریت)		-----		نسبت Na/Ca مولار
۲/۰ تا ۱/۵ (فلوئوریت)		-----		-----		نسبت Na/K مولار

همچنین با استفاده از این نمودار می‌توان به بررسی روند تحول سیال کانه‌ساز و تأثیر تبادلات سیال-سنگ رخ داده در زمان شکل‌گیری کانسنگ نیز دست یافت؛ به طوری که فرآیندهای اصلی مؤثر در تشکیل ذخیره شامل انحلال هالیت (افزایش Na)، دولومیتی شدن (افزایش Ca)، آلبیتی شدن (ناشی از دگرسانی پلاژیوکلاز و مصرف Na) و آدولاریتی شدن (افزایش K) بر آن قابل تشخیص است (شکل ۱۱). موقعیت قرارگیری و نسبت به دست آمده برای باریت‌های منطقه آتش کوه در نمودار شکل ۱۱، گویای مقادیر بالای Na در ترکیب آن و انطباق با فرآیند انحلال هالیت است که در نمودار سه‌تایی NaCl-CaCl₂-H₂O (شکل ۸) نیز حضور مقادیر بالای Na در ترکیب باریت‌ها می‌تواند مؤید تشکیل آن‌ها از انحلال هالیت باشد.



شکل ۱۱. نمودار دوتایی نسبت مولار Na/K در مقابل Na/Ca با استفاده از شیمی میانبارهای سیال در ذخایر اپی ژنتیک فلوئوریت-باریت (عسرب و روی) [۵] و موقعیت کانسار آتش کوه در آن. ذخایر مختلف شامل، (۱) شورابه‌های غنی از Ca، (۲) شورابه‌های غنی از Na، (۳) ذخایر Pb-Zn سیلورمن (ایرلند)، (۴) کمربند فلوئوریت شمال غرب اسپانیا، (۵) ذخایر فلوئوریت Austrias (شمال اسپانیا)، (۶) ذخایر Pb-Zn سیلسیا (هلند) و (۷) شورابه‌های حوضه‌های نفتی

ارتباط ناپیوستگی و منشأ عناصر کانه‌ساز

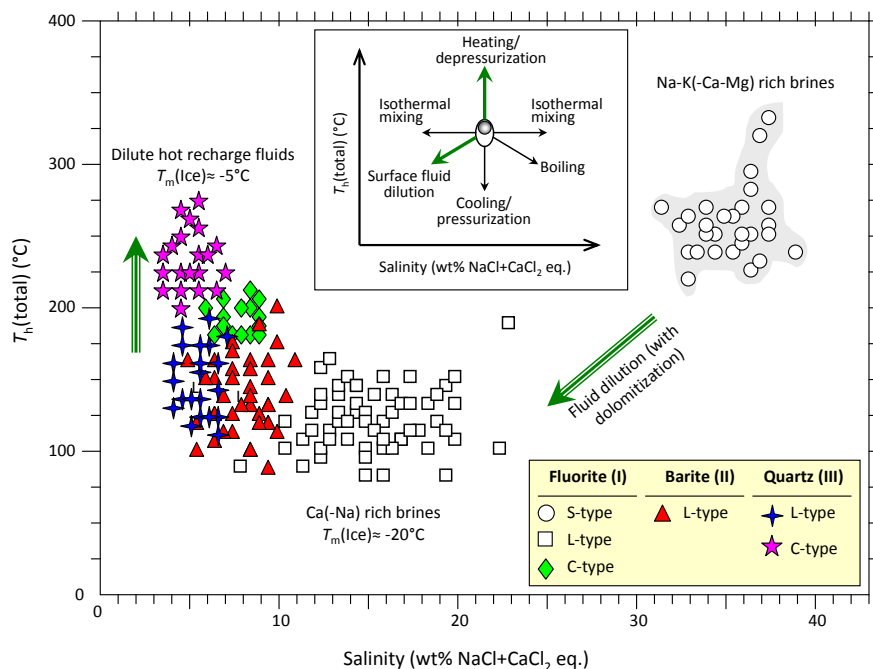
چنان‌که اشاره شد، در منطقه آتش‌کوه شیل و ماسه‌سنگ‌های آهکی سازند شمشک (ژوراسیک پیشین) و واحد آهک دولومیتی سازند بادامو (ژوراسیک میانی تا بالایی) سنگ میزبان‌های اصلی کانه‌زایی فلوتوریت هستند که این واحدهای سنگی در نتیجه عملکرد فاز کوه‌زایی سیمیرین میانی (۱۷۸ میلیون سال پیش) به‌طور ناپیوسته در بخش فوقانی آهک‌های ضخیم‌لایه تریاس میانی نهشته شده‌اند. طی بررسی‌های انجام شده روی زمین‌شناسی ذخایر فلوتوریت (سرب و روی) اروپا و شمال افریقا [۳-] [۶] مشخص شده است که سطح فرسایش یافته و هوازده به ضخامت چندین متر زیر افق ناپیوستگی^۱، به‌عنوان عاملی کلیدی برای تأمین فلز از افق‌های زیرین محسوب می‌شود؛ به‌طوری‌که پس از رخداد فرسایش، عملکرد فرآیندهای دگرسانی برون‌زاد در افق‌های هوازده رخنمون یافته موجب واکنش‌های شیمیایی گسترده به‌خصوص روی کانی‌های فیلسیلیکاته و فلدسپار سنگ بستر و استحصال فلز از ساختمان آن‌ها می‌شود. طی این واکنش‌ها، عناصر سرب و باریم از ساختمان فلدسپارها و فلور در نتیجه دگرسانی کانی‌های فیلسیلیکاته (نظیر بیوتیت) از سنگ بستر پالئوزوئیک آزاد شده‌اند که پس از آن به‌وسیله کانی‌های رسی و اکسید و هیدروکسیدهای آهن جذب می‌شوند. در این میان، وجود محلول‌های غنی از NaCl و محتوای کلرینیته زیاد در منطقه آتش‌کوه به‌عنوان عامل محرک، موجب تسریع این واکنش‌ها و در نتیجه استحصال هر چه بیشتر فلز از ساختمان کانی‌های مختلف می‌شود. طبق پژوهش‌های یاردلی [۴۷]، شورابه‌های نفوذی در سنگ بستر دگرسان‌شده، شرایط مناسبی برای افزایش انحلال‌پذیری فلزات و تشکیل کمپلکس‌ها فراهم می‌کنند که محتوای کلرینیته و دمای بالای سیال تأثیر مستقیمی بر افزایش این تبادلات خواهد داشت. علاوه بر این، محققان زیادی، محتوای فلزی بالا (شامل عناصر Cu, Pb, Zn, Fe و Mn) در شورابه‌های حوضه‌ای مرتبط با ذخایر فلزات پایه با میزبان کربناته^۲ را گزارش کرده‌اند که به عقیده [۴۸] مهاجرت این شورابه‌ها اغلب با گسل‌های حوضه‌ای و ریزشکستگی‌های موجود در ساختمان سنگ بستر انجام می‌شود. وجود شکستگی‌های محلی با راستای ESE-WNW و NNE-SSW در منطقه بررسی شده شرایط مناسبی برای مهاجرت سیال از سنگ بستر زیرین فراهم کرده که کانی‌سازی رگه‌ای نیز در راستای این شکستگی‌ها شکل گرفته است.

با توجه به شواهد، به‌نظر می‌رسد در منطقه آتش‌کوه شورابه‌های حوضه‌ای غنی از NaCl ضمن انجام تبادلات وسیع سیال-کانی دچار تحولات شیمی سیال از طیف غنی از Na به طیف شورابه‌های غنی از Ca-K-Mg±Na شده که طی آن رخداد متاسوماتیزم-Mg و فرآیند دولومیتی‌شدن موجب افزایش نسبت Ca/Na سیال و تشکیل کانی‌سازی فلوتوریت شده است. علاوه بر این، فعالیت‌های دگرگونی درجه کم در منطقه نیز موجب تحرکات بیشتر سیال و افزایش دمای محیط شده که طی آن وجود مقادیر CO₂ در ترکیب میانبارهای سیال میزبان فلوتوریت و کوارتز، ناشی از پدیده کربن‌زدایی^۳ طی مراحل مختلف کانی‌سازی است. طبق پژوهش‌های احیاء [۴۹]، فلوتور در کانسار فلوتوریت بزیمان از سنگ‌های اسلیت (۳۱۰۰ ppm) و آهک‌های (۲۰۰۰ ppm) میزبان کانی‌سازی، منشأ گرفته‌اند که چندین برابر غلظت این عنصر در سنگ‌های شیل (۶۸۰ ppm) و آهک (۲۵۰ ppm) فاقد کانی‌سازی است [۵۰]. در منطقه آتش‌کوه، بررسی ژئوشیمی عناصر نادر خاکی (REE)، گویای الگوی رفتاری مشابه میان نمونه‌های فلوتوریت و سنگ میزبان آهکی و اسلیت است، که طبق [۵۱]، احتمال منشأ گرفتن REEها و فلوتور از ترکیب این سنگ‌ها وجود دارد.

1. Unconformity
2. Carbonated-hosted

اختلاط سیال و پتانسیل کانی‌سازی سولفیدی در منطقه

در اغلب پژوهش‌های انجام شده روی ذخایر فلوتوریت-باریت (±سرب و روی) مرتبط با ناپیوستگی، شورابه‌های غنی از فلز با تغییرات وسیع ترکیب و کلرینیته بالا، اغلب در تعادل با سیالی داغ رقیق‌شده ناشی از تزریق مجدد قرار دارند [۵]. تغییرات کلرینیته سیال ناشی از حضور شورابه‌های غنی از Na-Ca و این سیالات رقیق‌شده، به نوعی نشان‌دهندهٔ رخداد اختلاط غیر هم‌دمای است که این ویژگی در نمودار دوتایی $T_m(\text{Ice})$ در مقابل $T_H(\text{total})$ (شکل ۱۰) نیز نمایش داده شد. با استفاده از نمودار دمای همگن‌شدن نهایی در مقابل شوری (شکل ۱۲) و مقایسه آن با روندهای مختلف تحول سیال [۵۲] چنین به نظر می‌رسد که رگه‌های فلوتوریت-باریت±سولفید منطقهٔ آتش‌کوه در نتیجه اختلاط غیر هم‌دمای اعضای انتهایی یک شورابه Na-K(-Ca-Mg) اولیه (میانبارهای آبگین حاوی فاز جامد) و شورابه‌های غنی از کلسیم (میانبارهای آبگین حاوی هیدروهاالت) ناشی از تبادلات سیال-سنگ بعدی، شکل گرفته است. پس از این، کاهش فشار ناشی از اختلاف عمق تقریبی ۱ کیلومتر (با گرادیان ژئوترمال $30^\circ\text{C}/\text{km}$) و جابه‌جایی سیال گرمایی رقیق شده در افق‌های سنگی زیرین، موجب افزایش دمای سیال و شکل‌گیری کانه‌زایی مراحل پایانی شده است (شکل ۱۲). با توجه به سرگذشت زمین‌شناسی منطقه، به نظر می‌رسد شورابه‌های چندفازی غنی از نمک اولیه، از انحلال بلورهای هالیت مرتبط با افق تبخیری محدوده زمانی تریاس بالایی-ژوراسیک پیشین در منطقه منشأ گرفته‌اند [۲۳ و ۲۵]. با در نظر گرفتن این مدل، می‌توان گفت شورابه‌های اولیه حاوی Mg^{2+} و Fe^{2+} با چرخش در شکستگی‌های سنگ بستر کانی‌سازی، ضمن انجام تبادلات Mg-Ca سیال-سنگ، موجب رخداد دگرسانی دولومیتی با حضور دولومیت‌های آهن‌دار^۲ و آزاد شدن حجم بالایی از Ca در سیال شده است.



شکل ۱۲. نمودار دوتایی دمای همگن‌شدن نهایی در مقابل شوری که در آن وضعیت میانبارهای سیال نمونه‌های فلوتوریت، باریت و کوارتز مراحل مختلف کانه‌زایی نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود فرآیندهای اختلاط غیر هم‌دمای سیال همراه با تبادلات سیال-سنگ Ca-Mg (ناشی از رخداد دولومیتی‌شدن) و تزریق مجدد آب‌های جوی رقیق‌شده (ناشی از اختلاف فشار و گرادیان ژئوترمال منطقه) در مراحل پایانی کانی‌سازی منطقه بر اساس نمودار پایه [۵۲] قابل تشخیص است.

1. Anisothermal mixing
2. Ferroan dolomite

علاوه بر این، رخداد پدیده اختلاط و کاهش دمای ناشی از رقیق‌شدگی سیال (شکل ۱۲)، شرایط مناسبی برای ناپایداری کمپلکس‌های فلزی به‌ویژه کلریدهای سرب، مس و اورانیوم فراهم می‌کند که نتیجه آن ته‌نشینی عناصر فلزی مختلف است که بستگی به محتوای فلزی و حضور بنیان گوگرد در محیط دارد [۵۳]. حضور گوگرد در محیط‌های رسوبی-دیاژنتیک طی دو فرآیند اصلی احیاء سولفات به‌وسیله باکتری‌ها در دمای کم (۰ تا ۸۰°C) و عامل حرارتی-شیمیایی با دمای نسبتاً زیاد (۱۰۰ تا ۱۸۰°C) اتفاق می‌افتد [۵۴]. حضور شورابه‌های غنی از فلز در میانبارهای کانسار آتش‌کوه بر خلاف محتوای کانی‌سازی فلزی ناچیز این ذخیره بوده است که در آن حجم کانی‌سازی سولفیدی (نظیر گالن، پیریت و کالکوپیریت) تنها کم‌تر از ۵ درصد رگه است. به‌نظر می‌رسد حضور ناچیز مواد آلی به‌طور محلی در بخش‌هایی از سازندهای منطقه منجر به احیای سولفات با فعالیت باکتری‌ها و عامل حرارتی-شیمیایی شده که طی آن با آزاد شدن مقادیر ناچیز H_2S ، ته‌نشینی سولفید فلزات به‌صورت پراکنده همراه با کانی‌سازی رگه‌ای فلونئوریت-باریت انجام شده است. از این رو، به‌دلیل حضور نداشتن کافی گوگرد احیاء در محیط تشکیل ذخیره، می‌توان گفت بخش عمده‌ای از فلزات مختلف Pb ، Zn ، Fe ، Cu و Mn به‌صورت بالقوه در ساختمان سیال باقی‌مانده و یا در مکان دیگری در فاصله از منطقه آتش‌کوه ته‌نشین شده‌اند. بنابراین، با انجام بررسی‌های اکتشافی و لیتوژئوشیمی احتمالاً می‌توان رخدادهای سرب و روی مناسبی در اطراف کانسار آتش‌کوه انتظار داشت که به‌عنوان منطقه‌ای امید بخش قابل معرفی است. به‌طور مشابه، ذخایر سرب و روی متعددی در اطراف کمربندهای فلورسپار در اروپا گزارش شده که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ذخایر فلونئوریت شمال (Austrias) و شمال شرق (Catalan Coastal Ranges) اسپانیا اشاره کرد [۴]، [۶].

نتیجه‌گیری

کانسار رگه‌ای فلونئوریت-باریت-سولفید آتش‌کوه با ماهیت اپی‌ژنتیک در میزبان سنگ‌های آهک دولومیتی، شیل و اسلیت‌های سازند شمشک و بادامو با گستره زمانی ژوراسیک پیشین تا میانی شکل گرفته، که طی آن سنگ میزبان کانی‌سازی در نتیجه عملکرد فاز کوه‌زایی سیمیرین میانی (۱۷۸ میلیون سال پیش) به‌طور ناپیوسته در بخش فوقانی آهک‌های ضخیم‌لایه تریاس میانی قرار گرفته است. به‌نظر می‌رسد، سطح فرسایش یافته و هوازده به ضخامت چندین متر زیر افق ناپیوستگی، به‌عنوان منشأ اصلی برای تأمین مواد معدنی از افق‌های زیرین باشد که طی آن عملکرد فرآیندهای دگرسانی برون‌زاد در افق‌های هوازده رخنمون یافته موجب واکنش‌های شیمیایی گسترده و استحصال عناصر سرب و باریم از ساختمان فلدسپارها و فلور در نتیجه دگرسانی کانی‌های فیلوسیلیکاته (نظیر بیوتیت) از سنگ بستر پالئوزوئیک شده است. در این میان، وجود محلول‌های غنی از $NaCl$ و محتوای کلرینیت بالایی سیال در کانسار آتش‌کوه موجب تسریع واکنش‌ها و در نتیجه خروج هر چه بیش‌تر عناصر از ساختمان کانی‌های مختلف شده است.

در منطقه آتش‌کوه، شورابه‌های حوضه‌ای غنی از $NaCl$ ضمن انجام تبادلات وسیع سیال-کانی دچار تحولات شیمی سیال از طیف غنی از Na به طیف شورابه‌های غنی از $Ca-K-Mg\pm Na$ شده که طی آن رخداد متاسوماتیزم- Mg و فرآیند دولومیتی‌شدن موجب افزایش نسبت Ca/Na سیال و تشکیل کانی‌سازی فلونئوریت شده است. با توجه به سرگذشت زمین‌شناسی منطقه، به‌نظر می‌رسد شورابه‌های چندفلزی در عضو انتهایی شورابه‌های غنی از $NaCl$ ، از انحلال بلورهای هالیت مرتبط با افق تبخیری محدوده زمانی تریاس بالایی-ژوراسیک پیشین، منشأ گرفته باشند. از سوی دیگر، به‌دلیل حضور

ناچیز مواد آلی و عامل H_2S ، در سازندهای منطقه و متعاقب آن عدم رخداد وسیع احیای سولفات به وسیله باکتری‌ها (یا عامل حرارتی-شیمیایی) موجب شده تا شرایط مساعدی برای کانی‌سازی سولفیدی فلزی در منطقه فراهم نشود. از آنجا که سیال فلوتوریت‌ساز با توجه به شوری و محتوای فلزی بالا قادر به تشکیل کانی‌سازی سولفیدی وسیعی نبوده، لذا به نظر می‌رسد پتانسیل کانی‌سازی فلزی این شورابه‌ها حفظ شده و احتمالاً با فاصله از منطقه آتش‌کوه و در یک محیط مناسب، کانی‌سازی فلزی انجام شده است.

تشکر و قدردانی

از مدیریت محترم شرکت صنعتی پودرسازان و آقایان مهندس بیگی و فیضی‌فر که امکانات دسترسی به معادن منطقه را فراهم کرده و راهنمایی‌های مفیدی نیز ارائه داشتند تشکر و سپاسگزاری می‌کنم. همچنین از دقت نظر و پیشنهادهای سازنده داوران نشریه علوم دانشگاه خوارزمی قدردانی می‌کنم.

منابع

- Hanor J.S., "Origin of saline fluids in sedimentary basins. In Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins", Special Publication Geological Society of London 78 (1994) 151-174.
- Gleeson S.A., Wilkinson J.J., Stuart F.M., Banks D.A., "The origin and evolution of base metal mineralising brines and hydrothermal fluids, South Cornwall", UK. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65 (2001) 2067-2079.
- Heijlen W., Muechez Ph., Banks D.A., "Origin and evolution of high-salinity, Zn-Pb mineralising fluids in the Variscides of Belgium", *Mineralium Deposita*, 36 (2001) 165-176.
- Pique' A., Canals A., Grandia F., Banks D.A., "Mesozoic fluorite in NE Spain record regional base metal-rich brine circulation through basin and basements during extensional events", *Chemical Geology* 257 (2008) 139-52.
- Boiron M.C., Cathelineau M., Richard A., "Fluid flows and metal deposition near basement/cover unconformity: lessons and analogies from Pb-Zn-F-Ba systems for the understanding of Proterozoic U deposits", *Geofluids* 10 (2010) 270-292.
- Sanchez V., Vindel E., Martin-Crespo M., Corbella M., Cardellach E., Banks D.A., "Sources and composition of fluids associated with fluorite deposits of Asturias (N Spain)", *Geofluids* 9 (2009) 338-55.
- Shelton K.L., Burstein I.B., Hagni R.D., Vierrether C.B., Grant S.K., Hennigh Q.T., Bradley M.F., Brandom R.T., "Sulfur isotope evidence for penetration of MVT fluids into igneous basement rocks", southeast Missouri, USA. *Mineralium Deposita* 30 (1995) 339-350.

8. Zák K., Dobes P., Sztacho P., "Variscan and late-Variscan vein mineralization types of the Czech part of the Bohemian Massif: a genetic model. In: Pagel, M., Leroy, J.L. (Eds.), Source", Transport and Deposition of Metals. Balkema, Rotterdam (1991) 235-238.
9. Boni M., Iannace A., Köppel V., Früh-Green G., Hansmann W., "Late to post-Hercynian hydrothermal activity and mineralization in southwest Sardinia (Italy)", *Economic Geology* 87 (1992) 2113-2137.
10. Carignan J., Gariépy C., Hillaire-Marcel C., "Hydrothermal fluids during Mesozoic reactivation of the St. Lawrence rift system, Canada: C, O, Sr and Pb isotopic characterization", *Chemical Geology* 137 (1997) 1-21.
11. Tornos F., Delgado A., Casquet C., Galindo C., "300 Million years of episodic hydrothermal activity: stable isotope evidence from hydrothermal rocks of the Eastern Iberian Central System", *Mineralium Deposita* 35 (2000) 551-569.
12. U.S. Geological Survey., "Mineral commodity summaries 2014", U.S. Geological Survey, (2014) 196.
13. Momenzadeh M., "Stratabound Lead-Zinc in the lower Cretaceous and Jurassic sediments in the Malayer-Esfahan district", unpublished PhD thesis, Heidelberg (1976) 300.
14. Ghorbani, M., "The economic geology of Iran", Springer (2013) 581.
15. Berberian M., King G.C.P., "Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", *Canadian Journal of Earth Sciences* 18 (1981) 210-265.
۱۶. افتخارنژاد ج.، "تفکیک بخش‌های مختلف ایران از نظر وضع ساختمانی در ارتباط با حوزه‌های رسوبی"، نشریه انجمن نفت ۸۲ (۱۳۵۹) ۲۸-۱۹.
۱۷. حقی پور ا.، آقائاتی ع.، "نقشه زمین‌شناسی ایران در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰۰"، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۹۸۹).
۱۸. سازمان زمین‌شناسی کشور، "برگه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ گلیپایگان" (۱۹۶۷).
19. Thiele O., Alavi M., Assefi R., Hushmand-zadeh A., Seyed-Emami K., Zahedi M., "Explanatory text of the Golpaygan quadrangle map 1:250,000. Geological Survey of Iran", *Geological Quadrangle E7*, (1968) 24.
20. Rachidnejad-Omran N., Emami M.H., Sabzehei M., Rastad E., Bellon H., Piqué A., "Lithostratigraphie et histoire paléozoïque à paléocène des complexes métamorphiques de la région de Muteh, zone de Sanandaj-Sirjan (Iran méridional)", *Comptes Rendus Geoscience* 334 (2002) 1185-1191.

21. Hassanzadeh J., Stockli D.F., Horton B.K., Axen G.J., Stockli L.D., Grove M., Schmitt A.K., "Douglas Walker U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement", *Tectonophysics* 451 (2008) 71-96.
22. Mohajjel M., Fergusson C.L., "Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran", *International Geology Review* 56 (2014) 263-287.
۲۳. شیخ الاسلامی مهر، "برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محلات"، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۸۴).
۲۴. محجل م، "برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گلپایگان"، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۹۹۲).
25. Ghasemi A., Talbot C.J., "A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran)", *Journal of Asian Earth Sciences* 26 (2006) 683-693.
۲۶. طالع فاضل ا، "ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب و ترکیب دولومیت‌های کانسار اپی ژنتیک فلوریت-باریت آتش کوه (جنوب دلیجان)"، *مجله ژئوشیمی* ۳ (۱۳۹۳) ۲۱۳-۲۲۴.
27. Roedder E., "Fluid inclusions", In: Ribbe, R.H. (Ed.), *Review in Mineralogy*, 12. Mineralogical Society of America (1984) 646.
28. Goldstein R.H., Reynolds T.J., "Systematics of fluid inclusions in diagenetic materials", *Society for Sedimentary Geology Short Course* 31 (1994) 199.
29. Van Den Kerkhof A.M., Hein U.F., "Fluid inclusion petrography. In: Andersen T, Frezzotti ML, Burke EAJ ed", *Fluid inclusions: phase relationships-methods applications (special issue)*, *Lithos* 55 (2001) 320.
30. Brown P.E., "FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data", *American Mineralogist* 74 (1989) 1390-1393.
31. Bakker R.J., Package FLUIDS 1., "Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties", *Chemical Geology* 194 (2003) 3-23.
32. Hall D.L., Sternert S.M., Bodnar R.J., "Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O", *Economic Geology* 65 (1988) 123-140.
33. Sterner S.M., Hall D.L., Bodnar R.J., "Synthetic fluid inclusions V: solubility relations in the system NaCl-KCl-H₂O under vaporsaturated conditions", *Geochim Cosmochim Acta* 52 (1988) 989-1005.
34. Bodnar R.J., Sterner S.M., Hall, D.L., "SALTY: a FORTRAN program to calculate compositions of fluid inclusions in the system NaCl-KCl-H₂O", *Computer Geoscience* 15 (1989) 19-41.
35. Bakker R.J., Baumgartner M., Doppler G., "Diffusion of water through quartz: a fluid inclusion study", *Goldschmidt* (2012) Abstracts.

36. Naden J., "CalcicBrine: A Microsoft Excel 5.0 Add-in for Calculating Salinities from Microthermometric Data in the System NaCl-CaCl₂-H₂O", PACROFI VI, Madison, USA (1996) 97-98.
37. Bowers T.S., Helgeson H.C., "FORTRAN programs for generating fluid inclusion isochores and fugacity coefficients for the system H₂O-CO₂-NaCl at high pressures and temperatures", *Computer Geoscience* 11 (1985) 203-213.
38. Shepherd T.J., Rankin A.H., Alderton D.H.M., "A practical guide to fluid inclusion studies", Blackie, Glasgow (1985) 239.
39. Steele-MacInnis M., Bodnar R.J., Naden J., "Numerical model to determine the composition of H₂O-NaCl-CaCl₂ fluid inclusions based on microthermometric and microanalytical data", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75 (2011) 21-40.
40. Roedder E., Bodnar R.J., "Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies", *Annual Review of Earth Planet Science* 8 (1980) 263-301.
41. Cathelineau M., Boiron M.C., "Downward penetration and mixing of sedimentary brines and dilute hot waters at 5 km depth in the granite basement at Soultz-sous-Forêts (Rhine graben, France)", *Comptes Rendus Geosciences* (2010).
42. Boiron M.C., Cathelineau M., Banks D.A., Buschaert S., Fourcade S., Coulibaly Y., Boyce A., Michelot J.L., "Fluid transfers at a basement / cover interface. Part II: large-scale introduction of chlorine into the basement by Mesozoic basinal brines", *Chemical Geology* 192 (2002) 121-40.
43. Derome D., Cathelineau M., Fabre C., Boiron M.C., Banks D.A., Lhomme T., Cuney M., "Paleo-fluid composition determined from individual fluid inclusions by Raman and LIBS: application to mid-Proterozoic evaporitic Na-Ca brines (Alligator Rivers Uranium Field, northern territories Australia)", *Chemical Geology* 237 (2007) 240-54.
44. Mathieu R., Cuney M., Cathelineau M., "Geochemistry of paleofluids circulation in the Franceville basin and around Olko natural reaction zones (Gabon)", *Journal of Geochemical Exploration* 69-70 (2000) 245-49.
45. Möller P., Woith H., Dulski P., Lüders V., Erzinger J., Kämpf H., Pekdeger A., Hansen B., Lodemann M., Banks D.A., "Main and trace elements in the KTB-VB fluid: composition and hints to its origin", *Geofluids* 5 (2005) 28-41.

46. Richard A., Pettke T., Cathelineau M., Boiron M.C., Mercadier J., Cuney M., Derome D., "Brine-rock interaction in the Athabasca basement (McArthur River Udeposit, Canada): consequences for fluid chemistry and uranium uptake", *TerraNova* 22 (2010) 303-308.
47. Yardley B.W.D., "Metal concentrations in crustal fluids and their relationship to ore formation", *Economic Geology* 100 (2005) 613-32.
48. Koziy L., Bull S., Large R., Selley D., "Salt as a fluid driver, and basement as a metal source, for stratiform sediment-hosted copper deposits", *Geology* 37 (2009) 1107-10.
49. Ehya F., "Variation of mineralizing fluids and fractionation of REE during the emplacement of the vein-type fluorite deposit at Bozijan, Markazi Province, Iran", *Journal of Geochemical Exploration* 112 (2012) 93-106.
50. Rose A.W., Hawkes H.E., Webb J.S., "Geochemistry in Mineral Exploration", 2nd ed. Academic Press, New York (1979) 657.
51. Schwinn G., Markl G., "REE systematics in hydrothermal fluorite", *Chemical Geology* 216 (2005) 225-248.
52. Wilkinson J.J., "Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits", *Lithos* 55 (2001) 229-272.
53. Stoffell B., Appold M.S., Wilkinson J.J., McClean N.A., Jeffries T., "Geochemistry and evolution of Mississippi Valley-Type mineralizing brines from the Tri-State and Northern Arkansas districts determined by LA-ICP-MS microanalysis of fluid inclusions", *Economic Geology* 103 (2008) 1411-35.
54. Machel H.G., "Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings: old and new insights", *Sedimentary Geology* 140 (2001) 143-75.